

引用格式: 杨军, 杨泽, 丛建辉, 等. 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(9): 1745-1758. [Yang J, Yang Z, Cong J H, et al. Optimization of China's provincial carbon emission responsibility sharing scheme based on the principle of responsibility and benefit matching[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1745-1758.] DOI: 10.18402/resci.2022.09.01

# 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

杨 军<sup>1,2</sup>, 杨 泽<sup>1,2</sup>, 丛建辉<sup>1,2</sup>, 张雅茜<sup>3</sup>

(1. 山西大学经济与管理学院, 太原 030006; 2. 山西大学绿色发展研究中心, 太原 030006;

3. 澳门大学社会科学学院, 澳门 999078)

**摘 要:** 省域碳排放责任标准界定是“双碳”目标下国家碳排放统计核算体系构建的重要内容。已有的省域碳排放责任共担方案对最终产品消费者的责任和收益关系考虑不足, 亟需进行优化以提升碳责任界定的公平合理性。本文构建FULL-MRIO 双边贸易隐含碳测算模型衡量碳排放转移责任, 同时以贸易“剩余”的变化衡量因碳排放所获收益, 并立足行业层面细化共担责任系数, 提出了责任和收益匹配视角下“谁获益谁担责”的中国省域碳排放责任共担优化方案。结果发现: ①省域共担责任系数由省域各行业贸易隐含碳规模、特征及获益共同决定, 在39.98%~60.02%之间, 相较于“均等分配法”等共担系数更具合理性; ②基于责任和收益匹配视角的共担碳排放责任体系, 多数省份碳排放责任介于生产侧和消费侧碳排放责任之间, 北京、天津等最终需求较高省份相较于生产侧碳排放和其他共担责任方案所承担的碳排放大幅上升, 内蒙古、山西等资源型省份碳责任显著下降; ③依据本文计算的共担责任可为省域间碳补偿关系确立新的方案, 在该方案下内蒙古、山西等省份被补偿规模较大, 这区别于直接碳排放量大但隐含碳排放量多的资源型省份需要为其他省份提供碳补偿的方案, 在政策层面更具公平性和可操作性。

**关键词:** 碳转移; FULL-MRIO 模型; 责任共担; “双碳”目标; 碳减排责任

DOI: 10.18402/resci.2022.09.01

## 1 引言

为推动中国“双碳”目标实现, 保障各项碳减排工作实施, 亟需构建核算精准、界定科学、公平合理的碳排放统计核算体系。2021年9月, 中共中央下发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》, 明确提出: 建立健全碳达峰、碳中和标准计量体系。2022年1月, 国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》, 强调加强碳排放统计核算能力建设, 深化核算方法研究, 推动建立更为公平合理的碳排放核算方法体系。为保障各地区在“经济社会系统性变革”下的可持续发展, 如何合理、科学地分配省际碳排放责任成为“体系”构建的

首要问题。中国各省份经济发展程度和碳排放强度不同<sup>[1,2]</sup>, 且存在省际间贸易隐含碳转移问题<sup>[3-5]</sup>, 为气候政策制定带来了阻碍的同时也使得碳责任分配更加复杂。在兼顾公平性和有效性的同时, 准确测度并分担各省碳排放责任对实现“双碳”目标至关重要<sup>[6]</sup>。

在过去较长一段时间内, 中国省域碳排放责任界定主要是从“生产者责任视角”出发, 遵循行政属地原则, 并采取自上而下行政命令的方式保障落实。“生产者责任原则”以联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)国家温室气体清单指南提出的生产侧碳排放责任分配方案为主, 界限明确、可操作

收稿日期: 2022-04-22, 修订日期: 2022-08-13

基金项目: 全国统计科学研究重点项目(2019LZ05); 山西省1331工程交叉学科建设项目(115541040); 2021年山西省高等学校教学改革创新项目(G2021040)。

作者简介: 杨军, 男, 湖北松滋人, 教授, 研究方向为区域经济。E-mail: yangjun@sxu.edu.cn

通讯作者: 丛建辉, 男, 山东潍坊人, 副教授, 研究方向为环境经济与政策。E-mail: congjianhui@sxu.edu.cn

性高,直接给生产者带来减排约束。但由于贸易一体化导致了大量的碳转移,产生“碳泄漏”问题,其公平性遭到质疑<sup>[6,7]</sup>。国内外学者相继提出以“消费者责任原则”来核算碳排放量<sup>[8]</sup>。“消费者责任原则”认为消费是碳排放的主要驱动因素,基于“谁消费谁负责”的核心思想,使消费者环境责任得到充分体现。同时,将碳排放的空间转移纳入考虑范围,有助于减少碳泄漏,促进减排技术外溢。但其存在降低生产方减排动力,增加减排目标不确定性的弊端<sup>[9]</sup>。“生产责任原则”和“消费责任原则”均为单一主体的碳排放核算方案,难以平衡高碳排放生产地和高碳足迹消费地之间的碳排放责任<sup>[10,11]</sup>,无法在保障减排动力的前提下满足易于实施的要求,因此需要综合考虑各主体权责关系进行责任共担<sup>[12-14]</sup>。

现有“共担责任原则”研究,涵盖责任主体较为全面,分担系数设计角度丰富,在国内省际层面的应用研究十分广泛,但对于评定标准和分配系数的确立仍未达成一致。生产侧和消费侧的利益独立性较大,现有共担方案主要分为系数法(在生产者与消费者之间确定某一比例分担)和分类法(按碳排放来源进行分担)<sup>[15]</sup>。Ferng等<sup>[16]</sup>、Rodrigues等<sup>[17]</sup>主张将共担系数设为0.5,以“均等分配法”将生产者和消费者的碳排放责任等分。Lenzen<sup>[18]</sup>等则对此种方法提出质疑,在强调生产端与消费端分担责任非对称性的基础上提出以增加值占净产出比重进行碳排放分配的方法。Piñero等<sup>[19]</sup>、汪燕等<sup>[11]</sup>、王文治<sup>[20]</sup>、王育宝等<sup>[21]</sup>学者依据生产活动中获取的增加值分担价值链上的碳排放责任。增加值视角对于生产地获益情况有较好刻画,中间产品流动产生的碳责任有更详细的划分,但对于最终产品消费者获益情况考虑不足。此外,也有学者通过其他角度提出不同的共担方案,例如以投入角度按比例分担碳排放责任、以企业归属地划分碳排放责任<sup>[22]</sup>、以增加值为利益综合设定动态共担系数<sup>[23,24]</sup>等。

综上所述,现有国内碳责任共担方案仍难以反映从原材料开采到最终消费整个过程中积累的相关责任与利益<sup>[25-27]</sup>,核算结果精确度有待进一步提高,需要将最终产品消费者获益情况和行业间异质

性纳入考虑范畴。因此,本文在厘清区域贸易隐含碳规模及流向的基础上,以贸易隐含碳为“责”,以贸易中碳排放利得为“益”,基于责任和收益匹配视角共担省际层面碳责任。从以下三方面对碳责任共担方案进行“优化”:①基于可获得的最新投入产出表(2017年),构建FULL-MRIO(Full Multi-Region Models)双边贸易隐含碳测算模型,厘清碳转移路径及空间流向,测算各省份碳转移规模,丰富中国省际碳排放责任核算体系的科学统计角度。②在贸易增加值衡量基础上聚焦贸易中碳排放利得,利用“生产者剩余”“消费者剩余”衡量省域间共担标准,确定共担责任系数,充分考虑最终产品消费者所获得的利益,体现“谁获益谁担责”的原则,扩充现有省域碳排放责任共担方案。③立足行业层面,细化省域共担责任系数,识别各省份共担责任的行业特征,区分省际碳责任共担标准行业层面的异质性,为各地提出易于实施、更加有效的政策建议。

## 2 方法与数据

### 2.1 FULL-MRIO模型构建

投入产出模型分为单区域投入产出模型(SRIO)和多区域投入产出模型(MRIO)。SRIO通常用于核算温室气体排放量和探究国民经济最终需求的其他环境影响,但其假定进出口产品技术同质,测算的进出口隐含碳结果有不确定性<sup>[20]</sup>。MRIO在方法学上进行了改进,各个区域及部门被区分开,贸易流内部化,可以具体地进行多区域之间能源和温室气体排放的研究。FULL-MRIO在MRIO基础上进一步发展,对数据基础要求消费品和中间产品的区分,可以有效地反映多区域贸易中供应链的溢出效应和反馈效应(区域A需求引致区域B中间需求变化,进而引致区域C生产的变化),测算结果更加准确。FULL-MRIO在国内外贸易隐含碳测算中到了广泛的应用<sup>[28]</sup>,是一项兼备合理和精确特性的核算方法。因此,本文将将其应用于共担排放方案中生产者责任和消费者责任碳排放量的测算。

在一个具有 $m$ 个区域 $n$ 个部门的多区域投入产出表中,研究区域 $s$ 和区域 $r$ 产品转移时,可将其他

2022年9月

区域看做一个整体区域 $g$ 。根据投入产出表横向平衡关系:

$$\begin{pmatrix} X^s \\ X^r \\ X^g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{ss} & A^{sr} & A^{sg} \\ A^{sr} & A^{rr} & A^{rg} \\ A^{gs} & A^{gr} & A^{gg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^s \\ X^r \\ X^g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y^{ss} + Y^{sr} + Y^{sg} \\ Y^{rs} + Y^{rr} + Y^{rg} \\ Y^{gs} + Y^{gr} + Y^{gg} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} EX^s \\ EX^r \\ EX^g \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $X^u$  ( $u=r, s, g$ ) 表示区域 $u$ 各部门的总产品;  $Y^u$  表示区域 $u$ 各部门的最终产品;  $A^{uv}$  表示区域 $v$  ( $v=r, s, g$ ) 各部门对区域 $u$ 各部门的直接消耗系数矩阵。公式(1)变形可得:

$$\begin{pmatrix} X^s \\ X^r \\ X^g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B^{ss} & B^{sr} & B^{sg} \\ B^{sr} & B^{rr} & B^{rg} \\ B^{gs} & B^{gr} & B^{gg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y^{ss} + Y^{sr} + Y^{sg} \\ Y^{rs} + Y^{rr} + Y^{rg} \\ Y^{gs} + Y^{gr} + Y^{gg} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B^{ss} & B^{sr} & B^{sg} \\ B^{sr} & B^{rr} & B^{rg} \\ B^{gs} & B^{gr} & B^{gg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} EX^s \\ EX^r \\ EX^g \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $B^{uv}$  表示区域 $v$ 各部门生产一单位最终产品消耗的区域 $u$ 各部门的产品量。令  $L^{ss} = (I - A^{ss})^{-1}$ 。由公式(1)可得对区域 $s$ 的总产出为:

$$X^s = L^{ss} Y^{ss} + L^{ss} Y^{sr} + L^{ss} Y^{sg} + L^{ss} A^{sr} X^r + L^{ss} A^{sg} X^g + L^{ss} EX^s \quad (3)$$

由公式(2)可得区域 $r$ 的总产出为:

$$X^r = \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{us} + \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{ur} + \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{ug} + \sum_u^{s,r,g} B^{ru} EX^u \quad (4)$$

同理可对区域 $g$ 的总产出做同样处理,并将公式带入式(3)得到区域 $s$ 总产出的分解:

$$\begin{aligned} X^s = & L^{ss} Y^{ss} + L^{ss} Y^{sr} + L^{ss} Y^{sg} + L^{ss} A^{sr} \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{us} + \\ & L^{ss} A^{sr} \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{ur} + L^{ss} A^{sr} \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{ug} + \\ & L^{ss} A^{sg} \sum_u^{s,r,g} B^{gu} Y^{us} + L^{ss} A^{sg} \sum_u^{s,r,g} B^{gu} Y^{ur} + \\ & L^{ss} A^{sg} \sum_u^{s,r,g} B^{gu} Y^{ug} + L^{ss} EX^s + \\ & L^{ss} \sum_u^{r,g} A^{su} B^{us} EX^s + L^{ss} \sum_u^{r,g} A^{su} B^{ur} EX^r + \\ & L^{ss} \sum_u^{r,g} A^{su} B^{ug} EX^g \end{aligned} \quad (5)$$

按公式(5)从左至右的公式顺序,引致区域 $s$ 生产的因素可以分解为13条路径(表1)。在区域 $s$ 和区域 $r$ 的双边贸易当中,区域 $r$ 消费最终产品引致的区域 $s$ 产品生产 $X^s$ 包括区域 $s$ 对区域 $r$ 的直接最终产品出口和利用区域 $s$ 中间产品生产的最终流入区域 $r$ 的最终产品,即路径2、5、8、12,如公式(6)所示:

$$X^{sr} = L^{ss} Y^{sr} + L^{ss} A^{sr} \sum_u^{s,r,g} B^{ru} Y^{ur} + L^{ss} A^{sg} \sum_u^{s,r,g} B^{gu} Y^{ur} + L^{ss} \sum_u^{r,g} A^{su} B^{ur} EX^r \quad (6)$$

## 2.2 双边贸易中的碳排放转移测算

定义区域 $u$ 各部门的碳排放系数矩阵 $E^u$ ,则区域 $r$ 消费最终产品引致的区域 $s$ 的碳排放量为:  $C^{sr} = E^s X^{sr}$ 。区域 $s$ 消费最终产品引致的区域 $r$ 的碳排放量为:  $C^{rs} = E^r X^{rs}$ 。区域 $r$ 引致的区域 $s$ 的碳排放净转移量为:  $CT^{sr} = CE^{sr} - CE^{rs}$ 。

表1 区域 $s$ 总产出路径分解

Table 1 Decomposition of total output path of region  $s$

路径	总产出路径分解
路径1	区域 $s$ 在本地生产最终产品并在本地进行最终产品消费
路径2	区域 $s$ 生产最终产品,区域 $r$ 进行最终产品消费
路径3	区域 $s$ 生产最终产品,区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 进行最终产品消费
路径4	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $r$ 生产最终产品,区域 $s$ 进行最终产品消费
路径5	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $r$ 生产最终产品,区域 $r$ 进行最终产品消费
路径6	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $r$ 生产最终产品,区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 进行最终产品消费
路径7	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 生产最终产品,区域 $s$ 进行最终产品消费
路径8	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 生产最终产品,区域 $r$ 进行最终产品消费
路径9	区域 $s$ 的中间产品调出到区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 生产最终产品,区域 $g$ 进行最终产品消费
路径10	区域 $s$ 最终产品出口国外
路径11	区域 $s$ 中间产品流出,经加工后流回,最终在区域 $s$ 出口至国外
路径12	区域 $s$ 中间产品流出,经加工,最终在区域 $r$ 出口至国外
路径13	区域 $s$ 中间产品流出,经加工,最终在区域 $s$ 和区域 $r$ 以外的其他区域 $g$ 出口至国外

注:路径1、4、7、11为本地内需碳排放量,路径2、3、5、6、8、9、12、13为中国省域间贸易隐含碳,路径10为中国各省份进出口贸易隐含碳。



## 2.3 责任和收益匹配视角下的碳责任核算框架

### 2.3.1 生产侧责任原则碳排放量核算

根据碳排放的初始生产地进行责任划分,在区域 $r$ 和区域 $s$ 的贸易当中,区域 $s$ 在生产者责任原则下的碳排放量: $C^{i, sr} = C^{ss} + C^{sr}$ 。生产者责任原则下区域 $s$ 的全部碳排放量为:

$$C^{i, s} = C^{ss} + C^{sr} + C^{sg} + CEX^s = E^s X^s \quad (7)$$

式中: $CEX^s$ 为路径10产品出口至国外所引致区域 $s$ 的碳排放。

### 2.3.2 消费侧责任原则碳排放量核算

根据碳排放的最终消费地进行责任划分。在区域 $r$ 和区域 $s$ 的贸易当中,区域 $s$ 在消费者责任原则下的碳排放量: $C^{c, sr} = C^{ss} + C^{rs}$ 。消费者责任原则下区域 $s$ 的全部碳排放量为:

$$C^{c, s} = C^{ss} + C^{rs} + C^{gs} + CIM^s \quad (8)$$

式中: $CIM^s$ 为区域 $s$ 从国外进口所引致的碳排放。本文各省份进口贸易隐含碳核算采用“国内技术假定”,以国内省域碳排放系数衡量进口商品的含碳水平。

### 2.3.3 责任和收益匹配原则碳排放量核算

在蕴含碳排放量的产品贸易过程中,其生产者和消费者均从中获得利益,根据“谁获益谁担责”的原则,双方应该共同分担双边贸易隐含碳排放责任。根据经济学基础理论,生产者与消费者在产品贸易中获得的经济利益由生产者剩余与消费者剩余所衡量。本文参考Michael等<sup>[27]</sup>的研究理念,聚焦省域间共担碳责任,细化碳责任共担系数。在环境规制之前,双边贸易不包括碳排放影响的相关成本,牺牲了承受气候变化影响的区域。倘若引入反映碳排放社会成本的碳价格,生产地和消费地这种“剩余”就会减少。将核算的“剩余”与贸易隐含碳责任匹配有利于准确衡量生产地和消费地的利益平衡关系。

假设两地区供给曲线和需求曲线有弹性 $\sigma$ 和 $\delta$ ,

则有: $\begin{cases} q_a = p_a^\sigma \\ q_d = p_d^\delta \end{cases}$  (此处 $a, d$ 分别表示供给曲线和需求

曲线下标),在没有加入碳价格时,生产者和消费者在价格 $P_0$ 达到均衡。现将气候变化成本表现在碳价格 $t$ ( $t$ 适用于任何双边贸易的碳价格水平)上:

$p_d = (1+t)p_a$ 。在均衡时 $q_d = q_a$ ,有:  
 $p_a = (1+t)^{\frac{\delta}{\sigma-\delta}}, p_d = (1+t)^{\frac{\sigma}{\sigma-\delta}}$ 。

因此,生产者剩余变化为:

$$\Delta PS = \int_{p_a}^{p_d} p^\sigma dp = \frac{1}{(1+\sigma)} \left[ 1 - (1+t)^{\frac{\delta(1+\sigma)}{\sigma-\delta}} \right] \quad (9)$$

消费者剩余变化为:

$$\Delta CS = \int_{p_0}^{p_d} p^\delta dp = \frac{1}{(1+\delta)} \left[ (1+t)^{\frac{\sigma(1+\delta)}{\sigma-\delta}} - 1 \right] \quad (10)$$

生产者和消费者剩余的大小取决于供给和需求的价格弹性。弹性越高,受碳价格影响的程度越低,碳价格产生之前获益越少。弹性越低,受碳价格影响的程度越高,碳价格产生之前获益越多。在供给完全固定的情况下,收益完全落在生产者身上,共担责任核算方法等效于生产者责任论;需求固定时,收益完全落在消费者身上,共担责任核算方法等效于消费者责任论。对于每一个双边贸易关系可以通过贸易增加值、产品贸易额和贸易隐含碳排放量等不同指标测算碳责任。因此,可根据各行业之间不同的增加值、产品贸易额和贸易隐含碳排放量反映行业间异质性,将共担系数细化至行业层面,对省级层面的共担系数进行“优化”。双边贸易碳价格 $t$ 确定根据贸易隐含碳排放量与贸易增加值 $B^{sr}$ 之比与当期碳价 $T$ 乘积确定:

$$t^{sr} = \frac{CE^{sr}}{B^{sr}} \cdot T \quad (11)$$

式中: $B^{sr} = L^{sr} V^{sr} X^{sr}$ ,  $V^{sr}$ 为增加值系数矩阵。生产地系数为 $S^{su} = \frac{\Delta PS}{(\Delta PS + \Delta CS)}$ ,区域 $s$ 在责任和收益匹配共担责任视角下碳排放总量为:

$$CR^s = CE^{ss} + CEX^s + \sum_{u=1, u \neq s}^m S^{su} CE^{su} + \sum_{u=1, u \neq s}^m (1 - S^{us}) CE^{us} \quad (12)$$

责任和收益匹配视角下区域 $s$ 碳排放量的构成依次为:区域 $s$ 本地生产产品且在本地消费产生的碳排放量;区域 $s$ 生产产品在其他区域消费产生的碳排放量与碳责任共担系数的乘积;其他区域生产在区域 $s$ 消费所产生碳排放与 $(1 - \text{经济利益共担系数})$ 的乘积;区域 $s$ 生产出口到国外引致的碳排放(出口隐含碳无法进行贸易价值分解)。

## 2.4 数据来源及处理

本文的投入产出数据来源于CEADs数据库提供的2017年中国31个省份42部门多区域投入产出

2022年9月

表 (<http://www.ceads.net/data/input-output-tables/>)。各省的碳排放量数据来源于CEADs数据库提供的2017年中国30省份排放清单(<https://www.ceads.net.cn/data/province/>);各省份调出价格弹性统一设定中国出口价格弹性,为1.85<sup>[29]</sup>;各省份需求弹性引用洪勇等<sup>[30]</sup>文中测算结果取对数后代替。当期碳价格 $T$ 根据全国主要碳市场(上海、北京、广东、深圳、湖北、天津、重庆)发布交易情况进行整理,2017年7大碳市场碳排放总成交量为0.63亿t,总成交额为11.70亿元,碳价格 $T$ 设定为成交均价18.68元/t。囿于西藏、港澳台地区数据缺乏,本文对除西藏、港澳台地区之外的30个省份进行碳排放测算。将投入产出表中的42部门合并为20部门,并将碳排放清单中的大类部门进行重新整合并拆分为20部门,与投入产出表对应:农业(AG),煤炭采选业(CM),石油和天然气开采业(PM),金属矿采选业(MM),非金属矿和其他矿采选业(NM),轻工业(LI),石油加工及炼焦业(PC),化学工业(CP),非金属矿物制品业(NP),金属冶炼及制品业(MP),机械设备制造业(EP),高技术制造业(TP),其他工业(OP),电力、热力及燃气的生产和供应业(ES),水生产和供应业(WS),建筑业(CO),交通运输业(TR),高技术服务业(TS),金融业(FI),其他服务业(OS)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 各省份分路径下的生产侧、消费侧碳排放

2017年中国生产侧和消费侧分省碳排放量如图1所示。各省生产侧碳排放量与消费侧碳排放量特征明显,在不同责任核算视角下,省域之间碳排放责任差距较大。具体可分为以下4类:第一类为山东、广东、江苏等双侧碳排放大省,这类省份在生产侧碳排放量和消费侧碳排放量均有较高的碳排放量,三省碳排放总量分别占生产侧、消费侧总排放量的21.12%、21.79%。广东、江苏和山东在2017年各省GDP排名中位列前三位,这类省份人口密集、制造业发达、综合发展水平较高,在生产端和需求端均具有较强的影响力;第二类为内蒙古、山西、河北等净碳转入大省,这类省份在生产侧碳排放量远大于消费侧碳排放量,净碳转入量分别达到了266.60 MtCO<sub>2</sub>、163.67 MtCO<sub>2</sub>、155.36 MtCO<sub>2</sub>,资源型省份长期对煤炭、石油等资源的开发,形成了以资源型产业为主导的产业结构,直接碳排放量大,在生产侧责任核算视角下承担高额的碳排放责任;第三类为北京、天津、上海等净碳转出大省,这类省份消费侧碳排放量远大于生产侧碳排放量,碳转出量较生产侧碳排放量比例分别为115.78%、35.69%、19.66%,这类省份对于产品或服务的需求主要依靠

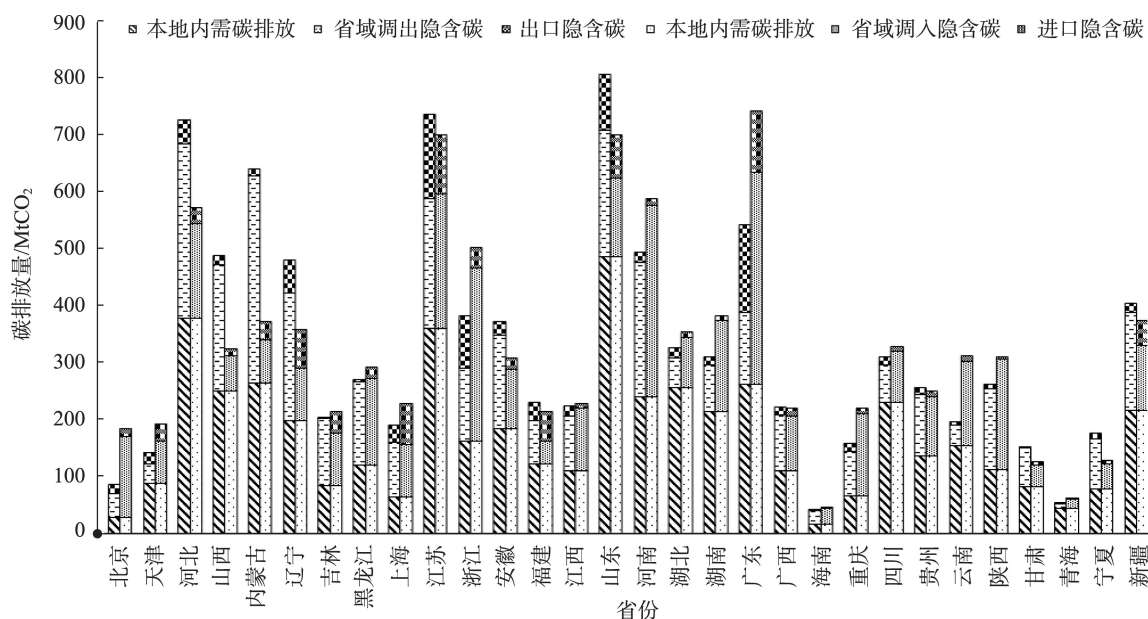


图1 2017年中国30省份生产侧和消费侧碳排放量

Figure 1 Carbon emissions of production side and consumption side of 30 provinces in China, 2017

其他省份的调入;第四类为海南、青海等绿色低碳省份,这类省份在生产侧和消费侧责任核算视角下承担责任均较少,无论在生产端产生的直接碳排放还是消费端引致的碳排放均影响较小,在碳减排方面的压力较少。

在分路径碳排放量对比下,本地内需碳排放与省域间调入调出隐含碳排放是中国各省份碳排放的主要来源,中国各省份本地内需碳排放占生产侧碳排放量在33.11%~82.01%之间,占消费侧碳排放量在15.34%~76.89%之间。其中青海、山西省是本地内需碳排放占生产侧、消费侧碳排放量最高的两个省份,青海省深处内陆参与国内外贸易程度均较低,山西省参与国际贸易程度较低,在国内贸易中主要以调出产品和服务为主,在需求侧主要来源于本省的产品和服务;北京、上海是本地内需碳排放占生产侧、消费侧碳排放量最小的两个省份。中国省域间贸易调入调出隐含碳排放是各省份隐含碳排放的主要部分,分别占生产侧、消费侧碳排放量38.94%和39.14%,远大于出口、进口贸易隐含碳所占比例9.26%和8.79%。

各省份对外贸易隐含碳差别较大,沿海地区进出口贸易隐含碳转入转出比例普遍大于内陆地区,其中碳转出比例最高的省份是广东省,占比28.65%,碳转入比例最高的省份是上海市,占比31.24%。中国整体对外进出口贸易存在净碳转入。分省来看,上海、吉林、新疆、福建、内蒙古、黑龙江、天津、辽宁、云南、甘肃、海南均存在着不同程度的净碳转出,净碳转出总量为190.15 MtCO<sub>2</sub>,上海是净碳转出最大的省份,净碳转出量为40.03 MtCO<sub>2</sub>;其余省份均为净碳转入省份,净碳转入总量为240.59 MtCO<sub>2</sub>,浙江是净碳转入最大的省份,净碳转入量为57.74 MtCO<sub>2</sub>。

### 3.2 各省份省域净碳转移

中国省域间存在着显著的净碳转移,各省份间净碳转移量如表2所示。从全国范围内来看,碳排放从京津地区、东南沿海地区向中部内陆地区、西北地区转入。内蒙古、山西、河北、辽宁、山东、安徽、宁夏、江苏、新疆、甘肃、福建、贵州、广西均是净碳转入省份。其中内蒙古、山西、河北三省的净碳转入量合计占全国总净碳转移量的56.22%。其余17省份均为净碳转出省份,主要集中在京津地区、

表2 2017年中国30省份省域间净碳转移量

Table 2 Domestic net carbon transfer in 30 provinces of China, 2017

省份	净碳转移/ MtCO <sub>2</sub>	省份	净碳转移/ MtCO <sub>2</sub>
广东	199.12	江西	3.88
浙江	119.65	海南	3.10
云南	117.10	广西	-1.92
北京	98.41	贵州	-5.16
河南	93.70	福建	-16.95
湖南	70.71	甘肃	-26.05
重庆	62.08	新疆	-29.90
天津	50.32	江苏	-37.22
陕西	48.17	宁夏	-47.17
上海	37.35	安徽	-63.41
湖北	28.89	山东	-106.84
黑龙江	21.77	辽宁	-121.28
四川	18.76	河北	-155.36
吉林	9.40	山西	-163.67
青海	8.66	内蒙古	-266.60

东南沿海地区,其中广东、浙江、云南、北京、河南、湖南、重庆、天津、陕西、上海10省份合计占比90.47%。其中内蒙古是净碳转入规模最大的省份且对其他省份均存在净碳转入,净碳转入总量为266.60 MtCO<sub>2</sub>。广东是净碳转出规模最大的省份,净碳转出总量为199.12 MtCO<sub>2</sub>。

碳排放区域范围转移具有很强的地域相联性,例如京津冀地区与周边地区,长三角与周边地区,广东及周边地区,其中广东向广西的碳调入占其他所有省份碳调入的38.58%。在“中心”区域经济增长与周边地区协同发展过程中,一定程度上产生了“虹吸”效应,区域性经济中心从周边地区调入大量的资源,在碳排放上表现为,区域经济中心为碳净转出地区,周边地区为碳净转入地区,且转入转出比例明显大于其他省份的转入转出。这体现出区域协同减排的重要性,简单将责任分担给承受碳转移的周边地区难以达到整体减排目标的实现且会抑制周边地区的减排积极性。

### 3.3 各省份分行业碳排放获益情况

各省份在贸易中因碳排放获得的利益即在加入碳价格之后的“生产者剩余”和“消费者剩余”变化,由供给需求弹性、贸易隐含碳排放量和双边贸易规模共同决定。青海、宁夏、新疆、内蒙古、黑龙江等省份获益较高;广东、北京、福建、上海、湖北等



2022年9月

省份获益较低。获益较多的省份由于其需求弹性较低,因此在加入碳价格之后不能及时调整其需求量,在目前的贸易中因碳价格获益更多。且其中多为资源型省份,其在贸易过程中多为高碳产品,隐含碳排放量较大,因此碳排放获得的效益更多。相反,广东等省份需求弹性较高,且贸易产品中多为低碳产品,其获益较少。

各省分行业碳排放获益情况如图2所示,各行业获益情况与贸易量及贸易隐含碳排放量高度相关,获益情况行业之间差别较大。各省份电力、热力及燃气的生产和供应业获益占比最高,获益占比最低的行业由各省份自身贸易特征所决定。电力、热力及燃气的生产和供应业占各行业总获益占比的42.44%。此外,非金属矿物制品业、交通运输业、石油加工及炼焦业、金属冶炼及制品业、煤炭采

选业获益占比相对较高,均在10%左右。各省份获益占比最低的行业为金融业、高技术服务业、高技术制造业、水生产和供应业、建筑业等,均在1.5%以下。

### 3.4 责任和收益匹配视角下的共担方案

基于责任和收益匹配视角,各省份分行业双边贸易中,生产侧共担系数在39.98%~47.73%之间,消费侧共担系数在52.27%~60.02%之间。碳责任共担系数由贸易碳价格与供给需求弹性共同决定,反映双边贸易中由碳排放产生效用的比值。电力、热力及燃气的生产和供应业碳责任共担系数消费侧共担系数最高,与获益情况一致。分行业共担责任差别最小的为广西向广东调出的建筑业,广西、广东分别承担47.73%、52.27%的碳排放责任,这是由于广西及广东作为需求弹性最小两省,弹性差别较

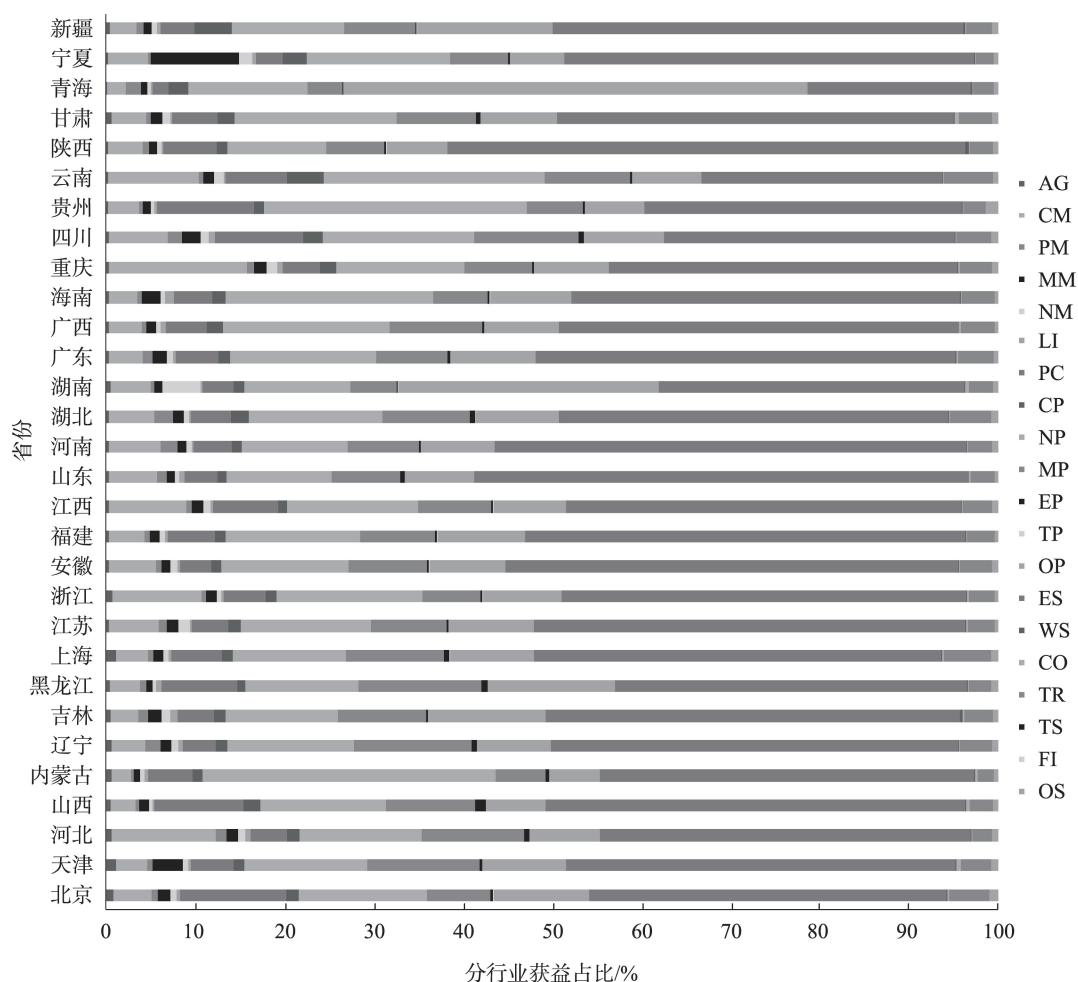


图2 2017年中国30省份分行业碳排放获益情况

Figure 2 Benefits of carbon emissions by industry in 30 provinces of China, 2017

小,导致获益差别小;共担责任差别最大的为青海向云南调出的其他工业,由青海承担39.98%的碳排放责任,云南承担60.02%的碳排放责任,这是由于青海与云南需求弹性差别较大且其他工业贸易碳价格较高,导致获益差别大。碳价格高的行业,生产者剩余与消费者剩余的比值增大,生产地与消费地的经济利益差别也会增加。责任共担标准在分行业划分下,核算方案更加明确,责任划分更加明晰。针对于各行业实现“源头”行业减排,使得各省在碳排放责任划分之后实施的减排政策更加有的放矢。

在责任和收益匹配原则下各省份双边贸易分担系数计算结果如表3所示。在双边贸易中各省份消费侧分担系数为各行业分担系数的加权平均,相较于行业间共担系数差别减小,消费侧共担系数在52.76%~57.30%之间。整体来看,在双边贸易中生产地分担较小的碳排放责任,消费地分担较大的碳排放责任。这是由于在目前排放CO<sub>2</sub>的过程中,生产地获得效用较小,消费地获得效用较大。广东是消费侧碳排放分担系数最小的省份,为52.76%;云南是消费侧碳排放分担系数最大的省份,为57.30%。云南、青海、辽宁等省份共担系数较高,广东、湖北、四川等省份共担系数较低,与获益情况相一致,体现了“谁获益谁担责”的原则。从地域特征

来看,南部区域、东部区域碳排放分担系数较小,中部内陆地区、西部地区分担系数较大。分担系数低的省份为弹性系数较低省份,在省份双边贸易中面对碳价格更难以调整自身的需求量或供给量,反映碳排放收益的生产者效用或者消费者效用变化较大,即该省份因碳排放获益较大。根据核算结果,各省份经济贸易情况、碳排放规模及生产消费结构差异巨大,碳排放责任方案既不能粗略划分也不能笼统确定。省域间碳责任共担方案应同时考虑双边贸易隐含碳规模、碳责任共担系数及碳排放来源构成,因地制宜地根据双边贸易隐含碳特征划分碳排放共担责任。

3.5 碳责任方案对比

通过对各个省份双边贸易隐含碳排放的责任分担,各省责任共担碳排放量如图3所示。在责任共担视角下,各省份的碳排放量产生不同程度的变化。山东和江苏为共担责任排放最高两省,分别为761.18 MtCO<sub>2</sub>和740.91 MtCO<sub>2</sub>;青海和海南为责任共担碳排放量最小两省,分别为58.18 MtCO<sub>2</sub>和43.07 MtCO<sub>2</sub>。相较于生产侧碳排放量,北京共担碳排放量上升幅度最大,为61.76%;广西上升幅度最小,为0.22%;贵州减少幅度最小,为0.03%;内蒙古减少幅度最大,为24.64%。多数省份在责任和收益匹配视角下碳排放量介于生产侧和消费侧碳排放量之间,即净碳转出省份比生产侧碳排放责任更大,但比消费侧碳排放责任更低。3种责任视角下各省份碳排放责任对比有以下特点:第一类为共担责任介于双侧碳排放之间省份,如北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、浙江、安徽、山东、河南、湖北、湖南、广东、重庆、四川、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏等省份,共担责任碳排放量介于生产侧和消费侧碳排放量之间。有此类碳排放特点的省份数量最多,这表明多数省域在国内贸易中应平衡生产侧与消费侧的碳排放责任。内蒙古、山西等生产侧减排压力较大的省份,应将碳责任分担给因其产品调出获益的产品调入地。北京、天津等消费侧远大于生产侧碳排放的省份,划分责任时应充分考虑其最终消费引致的碳排放量。第二类为碳排放责任核算视角不敏感型省份,如江西、黑龙江、海南、广西、贵州等省份,这类省份在共担责任视角下与生产侧碳排放量和消费侧碳排放量变化基本在5%以下。

表3 各省份双边贸易碳责任共担系数

Table 3 Carbon responsibility sharing coefficient of bilateral trade of each province

省份	生产侧分担系数%	消费侧分担系数%	省份	生产侧分担系数%	消费侧分担系数%
北京	46.02	53.14	河南	45.33	53.14
天津	45.93	55.40	湖北	46.02	52.96
河北	45.57	53.84	湖南	45.60	53.31
山西	45.39	53.65	广东	45.44	52.76
内蒙古	45.02	55.60	广西	46.16	55.39
辽宁	45.89	56.29	海南	45.53	53.79
吉林	45.43	55.37	重庆	45.49	55.48
黑龙江	45.54	55.43	四川	45.75	55.86
上海	45.70	53.54	贵州	45.55	56.22
江苏	45.50	55.07	云南	45.81	57.30
浙江	46.04	55.05	陕西	45.28	54.79
安徽	45.32	54.74	甘肃	45.37	55.86
福建	45.59	53.07	青海	45.72	56.15
江西	45.55	53.09	宁夏	44.94	54.93
山东	45.43	55.50	新疆	45.11	55.17



2022年9月

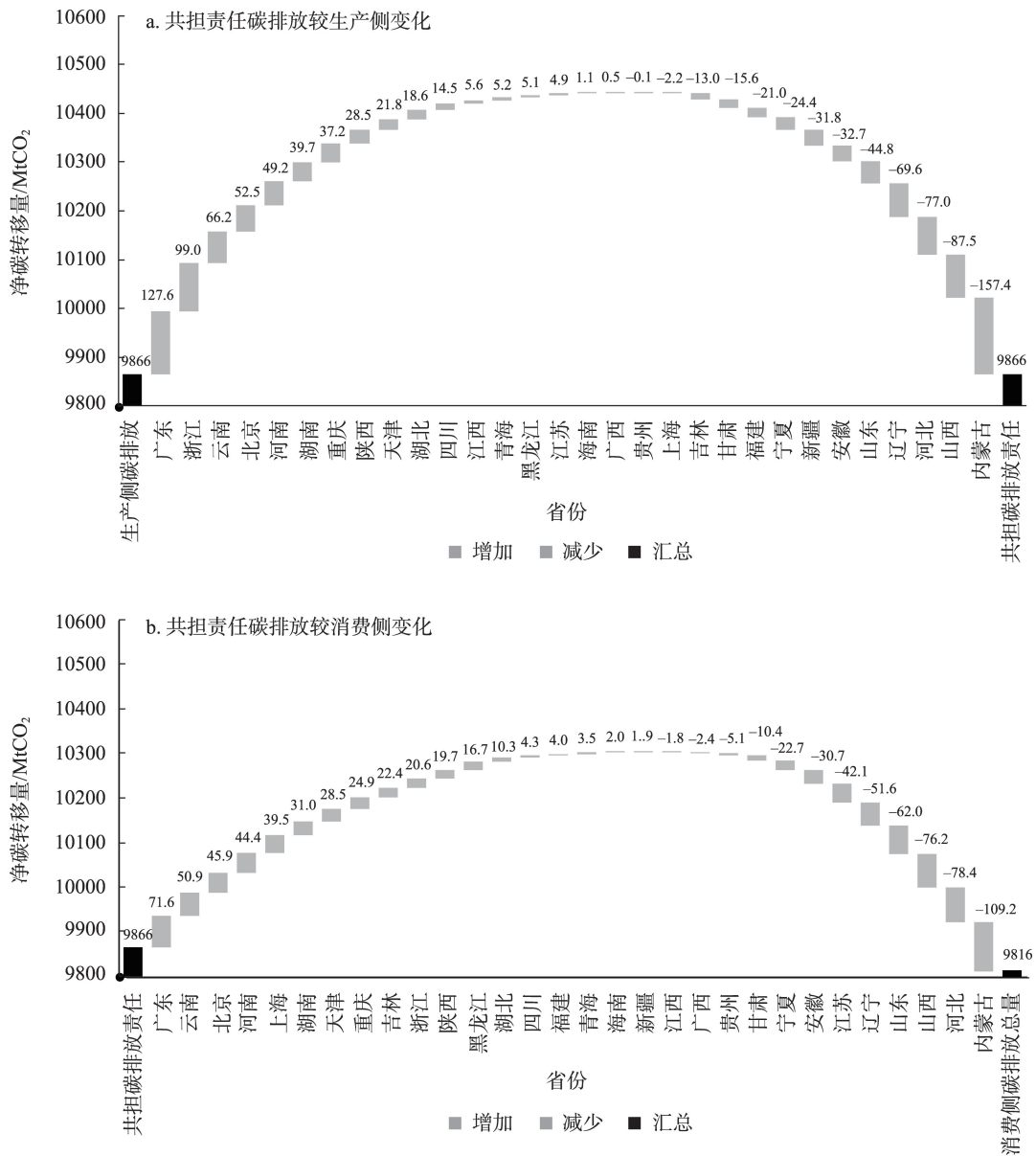


图3 各省份共担责任碳排放较生产侧、消费侧碳排放量变化情况

Figure 3 Carbon emissions under the provincial responsibility sharing scheme compared with carbon emissions of the consumption side and the production side

由于其自身生产碳排放不高,此类省份调入调出贸易规模大致相同且结构相对稳定。第三类为共担责任获益省份,如吉林、新疆、福建等省份,共担责任碳排放量小于生产侧、消费侧碳排放量。此类省份在共担责任后,承担更少的碳排放责任,代表其目前在碳排放过程中属于牺牲利益一方。第四类为共担责任增加省份,如江苏等省份,共担责任视角下的碳排放责任大于双侧碳排放量。基于生产侧和消费

侧碳排放责任方案均对此类省份碳责任有一定程度低估。根据责任和收益匹配视角,这类省份在产品调入和调出的过程中均从排放获取了较多利益,应该承担更多碳排放责任。与其他碳排放共担责任方案相比,内蒙古、山西等资源型省份排名大幅下降,北京、天津等最终需求较高的省份排名有明显上升。

### 3.6 省域共担责任横向补偿方案<sup>①</sup>

本文以共担责任原则下各省域的碳排放量为

<sup>①</sup> 在双边贸易责任共担过程中,本文将产品生产地称为被补偿省份,产品消费地称为补偿省份。

基础进行省域间横向补偿,具体方案如下:以电力、热力及燃气的生产和供应业内蒙古和广东的贸易为例,2017年生产责任原则与消费责任原则下,内蒙古分别应承担广东最终需求引致碳排放 27.70 MtCO<sub>2</sub> 和其最终需求引致广东在此行业生产产生的碳排放 1.96 MtCO<sub>2</sub>。在共担责任原则下,按照本文计算的行业共担责任因子进行分配,分别为 0.465 (广东流向内蒙古)和 0.444 (内蒙古流向广东)。责任共担后,广东流向内蒙古的 27.70 MtCO<sub>2</sub> 中(分担因子为 0.465 和 0.535),12.88 MtCO<sub>2</sub> 由内蒙古承担,14.82 MtCO<sub>2</sub> 由广东承担;内蒙古流向广东的 1.96 MtCO<sub>2</sub> 中(分担因子为 0.444 和 0.556),0.87 MtCO<sub>2</sub> 由广东承担,1.09 MtCO<sub>2</sub> 由内蒙古承担,最终电力、热力及燃气的生产和供应业贸易隐含碳,内蒙古承担 13.97 MtCO<sub>2</sub>,广东承担 15.69 MtCO<sub>2</sub>。然而内蒙古在生产责任原则下的实际碳排放量 27.70 MtCO<sub>2</sub>,

仍比共担责任标准下多 13.73 MtCO<sub>2</sub>,按照 2017 年全国碳排放交易均价,广东应给予内蒙古的金额补偿约为 2.56 亿元。在计算合并的 20 行业后,生产侧和消费侧碳排放较高的省份之间的碳补偿流向如图 4 所示。在具体补偿之中,内蒙古是碳排放被补偿规模最大的省份,共 29.41 亿元,贵州省是碳排放被补偿规模最小的省份,共 0.02 亿元。广东是碳排放补偿规模最大的省份,共 23.84 亿元。广西是碳排放补偿规模最小的省份,共 0.09 亿元。山东、江苏等省份虽然消费侧碳排放量较高,但碳排放构成主要来源于省内自给碳排放。全国整体的共担责任流向情况,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。在该方案下内蒙古、山西等省份被补偿规模较大,这区别于直接碳排放量大但隐含碳排放量多的资源型省份需要为其他省份提

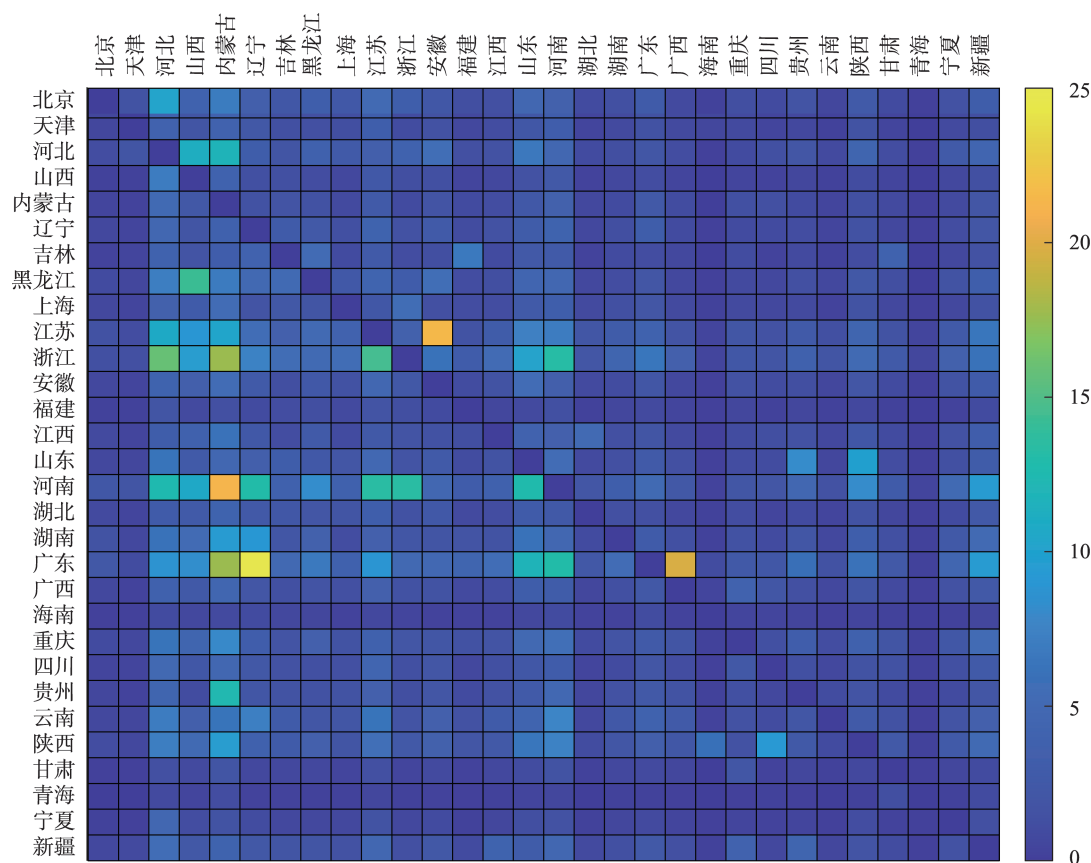


图4 2017年30省份责任共担碳排放流向 (MtCO<sub>2</sub>)

Figure 4 Shared responsibility carbon emission flows of 30 provinces, 2017 (MtCO<sub>2</sub>)

注:矩阵中横向、纵向分别表示其他省向某省的碳流入、碳流出关系,横纵相交位置颜色的深浅表示转移规模的大小;根据碳转移定义,对角线上数据为0。

2022年9月

供碳补偿的方案<sup>[31,32]</sup>。资源型省份在省际贸易中承担了大量的隐含碳责任,具有巨大的减排潜力,但目前减排能力有限。根据贸易获益情况提出的补偿方案在政策层面更具公平性和可操作性。具体补偿方式为建立政府-企业-个人综合补偿机制,在各省份之间定期实施补偿直至双方获益情况均等,由政府设定具体分担目标,颁布相关政策,可采用征收碳税等。

## 4 结论、讨论与政策建议

### 4.1 结论

本文利用2017年中国投入产出表和FULL-MRIO模型,核算省域双边贸易隐含碳排放量,以贸易“剩余”变化衡量收益,将“责”与“益”相匹配提出省际共担碳责任方案。得出以下主要结论:

(1)2017年中国省际贸易存在显著的空间碳转移现象,各省生产侧与消费侧碳排放量差距明显。省域之间碳转移路径共有13条,省域间调入调出隐含碳为各省份贸易隐含碳主要来源,占生产侧总排放量38.94%。从全国范围内来看,碳排放主要从京津地区、东南沿海地区调入中部内陆地区、西北地区;从区域范围来看,碳排放转移上具有很强的地域相关性,区域性的转入转出比例明显大于与其他省份的转入转出,表明区域协同减排的重要性。

(2)省际贸易中获益规模主要与贸易省份需求弹性有关。北京、福建等省份获益较低,青海、宁夏等省份获益较高。当双边贸易省份确定时,各行业获益情况与贸易量及贸易隐含碳排放量高度相关,获益情况行业之间差别较大。

(3)各省份共担责任系数取决于各行业贸易隐含碳规模、特征、获益情况。分行业双边贸易分担系数相较于分省差异性增大,细化了碳责任共担系数。分行业双边贸易中,共担系数在39.98%~60.02%之间,电力、热力及燃气的生产和供应业碳责任共担系数消费侧共担系数最高,与获益情况一致。

(4)基于责任和收益匹配视角,碳排放责任划分得到更好的统筹。绝大部分省份的责任共担视角下的碳排放量在生产侧和消费侧碳排放量之间,与其他碳排放共担责任方案相比,内蒙古、山西等

资源型省份碳排放排名大幅下降,北京、上海等最终需求较高的省份排名有明显上升。北京相较于生产侧碳排放上升幅度最高,为61.76%,资源型省份碳责任显著下降,内蒙古下降幅度最高,为24.64%。各省因自身碳排放结构碳排放量变化具有不同特征,同时存在江西、黑龙江等不敏感型省份,吉林、福建等共担责任获益省份,江苏、浙江等共担责任增加省份。

### 4.2 讨论

“共担责任原则”主要通过设计共担系数将生产端与消费端的碳责任进行分摊,可有效解决“生产侧责任原则”未考虑“碳泄漏”的问题,以及“消费侧责任原则”减排动力不足、难以实施的问题,以求保证公平性、合理性、科学性的统一。本文对产品贸易中所隐含CO<sub>2</sub>按照获得利益在生产者与消费者之间进行划分,充分考虑行业间异质性,为国内生产地与消费地之间划分责任提供一个优化方案,有效解决生产地与消费地之间通过贸易产生的碳转移的责益平衡问题。在此碳责任分担方案下,北京、天津等最终消费品高的省份分担责任更多,相应的产品调出地有着更少的碳排放责任。以利益与碳排放责任相匹配,更为符合“谁获益谁担责”的原则。由此确定的碳补偿方案中,资源型省份作为被补偿省份,减排压力得到减小,更加符合区域分工。不过,共担责任标准的确定仍有待进一步解决,本文所用碳排放责任共担方案旨在丰富碳排放核算体系,为碳排放划分标准提供新的角度。对于贸易隐含碳责任划分仍需因地制宜,综合考虑多重因素予以分担。

此外,投入产出法本身在数据核算上有一定误差,存在基础数据获取、投入产出表平衡、分配、假设比例及时间差异等不确定性问题。在处理过程中采用的国内技术假定,没有考虑国外不同生产技术和生产结构,忽略了各地区排放因子的差异,在核算进口贸易隐含碳过程中会产生误差。同时,囿于缺乏各省份供给价格弹性数据,本文假设了供给弹性的统一,在计算共担弹性系数时会弱化各省份贸易获益情况的差距。因此,碳排放统计数据尤其是基础数据仍然需要扩充,在进行产品贸易分解、贸易隐含碳等测算时,MRIO模型的不确定性需



要得到广泛关注,在核算精确性方面仍待提升。

### 4.3 政策建议

结合本文研究结果,提出以下政策建议:

(1)参考责任和收益匹配视角下的碳责任共担方案优化国家碳排放统计核算体系。运用本文基于FULL-MRIO双边贸易隐含碳测算模型结果,根据双边贸易隐含碳规模、碳责任共担系数及碳排放来源构成共同决定碳排放责任共担方案,立足责任和收益匹配视角,完善碳核算基础数据,丰富现有“双碳”目标下的国家碳排放统计核算体系。

(2)建立省域间横向碳补偿机制。为缩减省域间减排能力差异,弥补资源型省份资金、技术不足,强化高碳地区减排能力,政府可依据省域间贸易隐含碳责任规模及责任和收益匹配关系确定碳补偿省份与被补偿省份,建立责任与收益相匹配、公正与高效相结合的横向碳补偿机制。

(3)考虑区域间异质性,针对不同碳排放结构来源实行分源减排。本地内需碳排放较高一类省份(如山东等),可通过减少自身需求,加强直接排放约束,重点从省内碳排放来源着手。省内调入调出碳排放较高一类省份(如内蒙古等),可加强与其他省份合作,增加对低碳产品、绿色产品的需求,促进上游省份实现源头减排。国际贸易碳转入转出碳排放较高的省份(如上海等),应强化绿色技术的国际合作,减少高碳产品的进口,更加精准有效、有的放矢地落实减排政策。

(4)加强区域间协同减排合作。中国省域间碳排放转移具有很强的区域相关性,区域间碳转移量远高于与其他省份的碳转移量。如京津与周边地区、江浙沪与周边地区、广东与广西等区域相连性较高的区域范围,为重塑“双碳”目标下的区域联合减排新格局,可在碳减排、绿色发展等领域打破行政壁垒,通过经济补偿、技术分享、人才交流、减排合作等方式加强碳排放减排合作。

### 参考文献(References):

- [1] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO<sub>2</sub> emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. *Applied Energy*, 2016, 184(15): 742–750.
- [2] 郭珊, 韩梦瑶, 杨玉浦. 中国省际隐含能源流动及能效冗余解析[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 733–744. [Guo S, Han M Y, Yang Y P. Multiregional embodied energy flows and energy efficiency redundancy in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 733–744.]
- [3] 邓光耀, 陈荟荟. 增加值贸易视角下中国区域间隐含碳贸易测算及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1036–1050. [Deng G Y, Chen H H. Estimating China's regional embodied energy trade from the perspective of value-added trade and its influencing factors[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1036–1050.]
- [4] 李艳梅, 牛苗苗, 张红丽. 京津冀区域内增加值贸易的经济收益和隐含碳排放比较[J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1619–1629. [Li Y M, Niu M M, Zhang H L. Comparison of economic benefits and embodied carbon emissions of intraregional value-added trade in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1619–1629.]
- [5] 陈晖, 温婧, 庞军, 等. 基于31省MRIO模型的中国省际碳转移及碳公平研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5540–5550. [Chen H, Wen J, Pang J, et al. Research on the carbon transfer and carbon equity at provincial level of China based on MRIO model of 31 provinces[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(12): 5540–5550.]
- [6] 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(6): 82–96. [Cong J H, Shi Y, Gao H, et al. Research on the responsibility accounting of china's provincial carbon emission under the “Double Carbon” goal: Based on the perspective of “Income Responsibility” [J]. *Journal of Shanghai University of Finance and Economics*, 2021, 23(6): 82–96.]
- [7] 夏炎, 吴洁. 中国碳生产率减排目标分配机制研究: 基于不同环境责任界定视角[J]. *管理评论*, 2018, 30(5): 137–147. [Xia Y, Wu J. Provincial carbon productivity target allocation plan in China: Producer and consumer responsibility[J]. *Management Review*, 2018, 30(5): 137–147.]
- [8] 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, 50(1): 168–182. [Peng S J, Zhang W C, Sun C W. China's production-based and consumption-based carbon emissions and their determinants[J]. *Economic Research Journal*, 2015, 50(1): 168–182.]
- [9] 丛建辉, 常盼, 刘庆燕. 基于三维责任视角的中国分省碳排放责任再核算[J]. *统计研究*, 2018, 35(4): 41–52. [Cong J H, Chang P, Liu Q Y. Re-evaluation of China's provincial carbon emissions responsibility based on three-dimensional perspective[J]. *Statistical Research*, 2018, 35(4): 41–52.]
- [10] 王文举, 陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究: 基于责任与目标、公平与效率的视角[J]. *管理世界*, 2019, 35(3): 81–98. [Wang W J, Chen Z L. Research on the initial carbon quota allocation scheme of provincial regions in China: From the perspective of responsibility and target, fairness and efficiency[J]. *Management World*, 2019, 35(3): 81–98.]

2022年9月

- tive of responsibility and goal, fairness and efficiency[J]. *Management World*, 2019, 35(3): 81–98.]
- [11] 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, (1): 40–51. [Wang Y, Wang W Z, Ma S Q. Responsibility sharing of China's inter provincial carbon emission and cooperation in carbon reduction[J]. *Zhejiang Social Sciences*, 2020, (1): 40–51.]
- [12] 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): 19–31. [Zhang T B, Meng L D, Sun J. Common responsibility for carbon emissions: Measure optimization and international comparison[J]. *Finance and Trade Research*, 2018, 29(10): 19–31.]
- [13] Tukker A, Pollitt H, Henkemans M. Consumption-based carbon accounting: Sense and sensibility[J]. *Climate Policy*, 2020, 20(1): 1–13.
- [14] Chen W M, Lei Y L, Feng K S, et al. Provincial emission accounting for CO<sub>2</sub> mitigation in China: Insights from production, consumption and income perspectives[J]. *Applied Energy*, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113754.
- [15] 王猛猛, 刘红光. 碳排放责任核算研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(10): 2502–2511. [Wang M M, Liu H G. Progress of research on the accounting of carbon emission responsibility[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(10): 2502–2511.]
- [16] Ferng J J. Allocating the responsibility of CO<sub>2</sub> over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(1): 121–141.
- [17] Rodrigues J, Domingos T, Giljum S, et al. Designing an indicator of environmental responsibility[J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(3): 256–266.
- [18] Lenzen M, Murray J, Sack F, et al. Shared producer and consumer responsibility—Theory and practice[J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 27–42.
- [19] Piñero P, Bruckner M, Wieland H, et al. The raw material basis of global value chains: Allocating environmental responsibility based on value generation[J]. *Economic Systems Research*, 2018, DOI: 10.1080/09535314.2018.1536038.
- [20] 王文治. 中国省域间碳排放的转移测度与责任分担[J]. *环境经济研究*, 2018, 3(1): 19–36. [Wang W Z. Calculation on net value of carbon emission transfer between China's provinces and responsibility sharing[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2018, 3(1): 19–36.]
- [21] 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(1): 15–25. [Wang Y B, He Y P. Responsibility allocation of China's provincial net carbon transfer from the perspective of value-added[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(1): 15–25.]
- [22] Ortiz M, LA López, Cadarso M. EU carbon emissions by multinational enterprises under control-based accounting[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105104.
- [23] 王喜莲, 金青. 碳中和背景下中国贸易隐含碳排放及责任分担[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(11): 205–210. [Wang X L, Jin Q. China's trade embodied carbon emissions and shared responsibility under the background of carbon neutrality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(11): 205–210.]
- [24] 朱点钰, 马小林, 张艳霞, 等. 中国分省的碳排放责任分担机制探讨[J]. *环境保护*, 2018, 46(12): 58–63. [Zhu D Y, Ma X L, Zhang Y X, et al. Discussion on the sharing mechanism of carbon emission responsibility in China[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(12): 58–63.]
- [25] 李晖, 刘卫东, 唐志鹏. 全球贸易隐含碳净转移的空间关联网特征[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 682–692. [Li H, Liu W D, Tang Z P. Spatial correlation network of net carbon transfer in global trade[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 682–692.]
- [26] 刘宏筵, 张济建, 张茜. 全球供应链视角下的中国碳排放责任与形象[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 652–668. [Liu H D, Zhang J J, Zhang X. China's carbon emission responsibility and image from the perspective of global supply chain[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 652–668.]
- [27] Jakob M, Ward H, Steckel J C. Sharing responsibility for trade-related emissions based on economic benefits[J]. *Global Environmental Change*, 2021, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102207.
- [28] 王文治, 陆建明. 中国对外贸易隐含碳排放余额的测算与责任分担[J]. *统计研究*, 2016, 33(8): 12–20. [Wang W Z, Lu J M. Calculation on China's balance of carbon emissions embodied in trade and responsibility sharing[J]. *Statistical Research*, 2016, 33(8): 12–20.]
- [29] 印梅, 王光伟, 王敏. 基于ADL与ECM模型的出口供给弹性分析[J]. *经济与管理*, 2012, 26(2): 19–23. [Yin M, Wang G W, Wang M. Analysis on export supply elasticity based on ADL and ECM models[J]. *Economy and Management*, 2012, 26(2): 19–23.]
- [30] 洪勇, 许统生. 中国国内商品市场整合研究: 基于需求-价格关系的视角[J]. *南方经济*, 2016, (3): 16–35. [Hong Y, Xu T S. The research on the market integration of domestic goods in China: Based on the view of relationships of demand and price[J]. *South China Journal of Economics*, 2016, (3): 16–35.]
- [31] 吴立军, 田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J]. *地理研究*, 2022, 41(1): 149–166. [Wu L J, Tian Q B. Study on regional carbon ecological security and ecological compensation in China under carbon neutralization target. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 149–166.]
- [32] 马明娟, 李强, 周文瑞. 碳中和视域下黄河流域碳生态补偿研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(12): 5–11. [Ma M J, Li Q, Zhou W R. Study of carbon ecological compensation in Yellow River Basin based on carbon neutrality[J]. *Yellow River*, 2021, 43(12): 5–11.]

# Optimization of China's provincial carbon emission responsibility sharing scheme based on the principle of responsibility and benefit matching

YANG Jun<sup>1,2</sup>, YANG Ze<sup>1,2</sup>, CONG Jianhui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yaxi<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Green Development Research Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. Faculty of Social Sciences, University of Macau, Macao 999078, China)

**Abstract:** The definition of provincial carbon emission responsibility standards is an important part of the construction of the national carbon emission statistical accounting system under the carbon peaking and carbon neutrality goals. The existing provincial carbon emission responsibility sharing scheme does not give enough consideration to the responsibility and benefit relationship of consumers of the final products, so it is urgent to optimize the scheme to improve the fairness and soundness of carbon emission responsibility definition. This study built a full multi-region (FULL-MRIO) bilateral trade implicit carbon measurement model to measure carbon emission transfer responsibility and the gains from carbon emissions with the change of trade “surplus”. Based on the industry-level analysis, this study refined the coefficient of shared responsibility, and put forward the optimization scheme of China's provincial carbon emission responsibility sharing with the principle of “beneficiaries bear the responsibility” from the perspective of responsibility and benefit matching. The results show that the provincial shared responsibility coefficient is jointly determined by the scale, characteristics, and benefits of the trade implied carbon of various industries in the province, and it ranges from 39.98% to 60.02%, which is more reasonable than the equal distribution method and other shared responsibility coefficients; Based on the responsibility and benefit matching perspective, the carbon emission responsibility of most provinces is between that of the production side and the consumption side. Compared with the production side carbon emission responsibility and other shared responsibility schemes, the carbon emission responsibilities of provinces with high final demand, such as Beijing and Tianjin, have increased significantly, while the carbon emission responsibilities of resource based provinces, such as Inner Mongolia and Shanxi, have decreased significantly; According to the shared responsibility calculated in this study, a new scheme can be established for the inter-provincial carbon compensation relationship. Under this scheme, Inner Mongolia, Shanxi, and some other provinces are compensated on a large scale, which is different from the scheme that resource based provinces with large direct carbon emissions but also large implicit carbon emissions need to provide carbon compensation for other provinces, and this scheme would be more equitable and operable at the policy level.

**Key words:** carbon transfer; FULL-MRIO model; responsibility sharing; carbon peaking and carbon neutrality goals; carbon emission reduction responsibility