

引用格式: 王文治, 胡雍, 张晓宇. 中国省域碳排放责任分配方法比较与碳补偿设计[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 1913–1930.
[Wang W Z, Hu Y, Zhang X Y. Comparison of carbon emission responsibility allocation methods and carbon compensation design among provinces in China[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1913–1930.] DOI: 10.18402/resci.2023.10.01

中国省域碳排放责任分配方法比较 与碳补偿设计

王文治^{1,2}, 胡雍³, 张晓宇²

(1. 碳排放权交易省部共建协同创新中心, 武汉 430205; 2. 天津师范大学经济学院, 天津 300387;
3. 浙江工商大学经济学院, 杭州 310018)

摘要:【目的】伴随国内价值链分工体系的不断深化, 省域间中间品和最终品流动导致不同计量方法下的省域碳排放责任存在巨大差异, 进而探索科学合理的区域碳排放责任计量方法是推进省域间碳减排合作的重要前提。【方法】基于中国碳核算数据库发布的2007—2017年碳排放数据, 运用多区域投入产出模型, 首次将生产责任原则、消费责任原则、共担责任原则、技术调整的消费责任原则、生产者碳足迹原则和收入责任原则6种碳排放责任计量方法置于统一的测算框架下, 创新设计“一省一期, 一票一分”的投票制度, 从公平与效率视角对6种计量方法实施比较, 进而基于评估结果设计省域综合碳排放责任界定方法, 并构建省域间碳补偿方案。【结果】①不同计量方法下界定的省域碳排放量存在较大差异, 而共担责任原则和技术调整的消费责任原则计量方法相对折中。②在6种计量方法中, 从整体公平视角看, 共担责任原则最优; 从个体公平视角看, 收入责任原则最优; 从碳排放效率视角看, 生产者碳足迹原则最优; 而生产责任原则和消费责任原则在公平和效率上均表现欠佳。【结论】多维视角下的省域综合碳排放责任界定方法更加折中和合理。建议以省域综合碳排放责任计量方法为基准, 通过建立碳减排合作试点区, 探索区域间碳补偿经验。

关键词: 碳排放责任; 多区域投入产出模型; 公平与效率; 碳补偿; 相对剥夺; 数据包络分析; 中国

DOI: 10.18402/resci.2023.10.01

1 引言

2020年9月22日中国在第七十五届联合国大会上提出: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”^①。2021年10月24日《中共中央、国务院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》发布, 从中央层面对实现双碳目标进行了系统规划和总体部署。各省域基于自身发展实际也在积极探索“双碳”目标的实现路径, 其中, 全国碳减排责任省域分配是高质量完成中国碳达峰碳中和

目标的重要政策之一^[1]。此外, 各省域在降低碳排放和提升环境质量的同时也在积极探索碳排放治理合作^[2]。无论碳减排责任分配或是碳减排合作, 其重要前提都需要科学合理界定省域碳排放责任。然而, 伴随国内价值链分工体系的不断深化, 原材料供给、产品生产和最终消费被分割于不同地区, 省域间中间品和最终品流动中隐含了大量的碳排放, 进而导致在不同碳排放责任计量方法下确定的省域碳排放量存在巨大差异。例如, 东部沿海、南部沿海以及京津地区的净碳转出量较大, 西北地区的净碳转入量较大^[3], 净碳转出省域的消费侧碳

收稿日期: 2023-04-13 修订日期: 2023-08-26

基金项目: 国家社会科学基金项目(19BJY084)。

作者简介: 王文治, 男, 山西太原人, 博士, 教授, 主要研究方向为贸易和环境政策。E-mail: wangwz_zjgs@126.com

① 中国政府网, http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm。

排放显著高于其生产侧碳排放,净碳转入省域则恰好相反;能源富集省域(如晋陕蒙)收入责任原则视角下的碳排放量显著高于其生产侧和消费侧碳排放量^[4]。鉴于此,探索科学合理的碳排放责任计量方法已引起学者的广泛关注,目前在经典多区域投入产出模型(Multi-Regional Input-Output Model, MRIO)下区域碳排放的主要计量方法包括:生产责任原则(Production Based Approach, PBA),消费责任原则(Consumption Based Approach, CBA),共担责任原则(Shared Responsibility Approach, SRA),技术调整的消费责任原则(Technology Adjusted CBA, TCBA),生产者碳足迹原则(Producer Footprint Approach, PFA)和收入责任原则(Income Based Approach, IBA)等。

生产责任原则因其数据易得和核算步骤简便的优点而被各国广泛应用,中国省级碳排放清单编制也均采用生产责任原则计量方法。因生产责任原则忽略了国际贸易引致的“碳泄露”问题,在责任分配公平性上饱受争议^[5]。多数发展中国家在生产责任原则下承担了较高的碳排放责任^[6],国内能源富集和重化工省域的生产侧碳排放责任也相对较高^[7]。消费责任原则从碳足迹的视角将贸易引致的碳排放纳入核算体系,能有效克服“碳泄露”问题^[8],且有利于从消费侧角度控制全球碳排放增加^[9]。然而消费责任原则亦存在一些不足:首先,测算模型数据要求较高,且受商品贸易跨境次数的影响,消费责任原则下的MRIO模型的有效性不断下降^[10]。其次,消费责任原则下生产国的出口隐含碳被记录在最终消费地,对高碳排放强度的生产地缺乏直接约束^[11]。第三,鉴于生产国的商品出口可获取经济利益,将出口隐含碳完全归属于消费国亦不尽合理。最后,进口国在提升减排技术上的努力无法降低其消费侧碳排放责任,进而抑制了其提升减排技术的积极性^[12],使消费侧碳排放管理缺乏效率。

鉴于生产责任原则和消费责任原则计量方法均存在不足,共担责任原则不失为一种较为折中的分配方法,在有效控制“碳泄漏”问题的同时更体现公平性。责任共担的核心问题在于如何将区域间的净碳转移量按合理的分配系数在生产者和消费者(或收入者和生产者)之间实施分配。彭水军等^[13]

基于世界投入产出数据库(World Input-Output Database, WIOD)对主要碳排放责任分担方法进行了测算和比较,结果显示各种责任分担方案均能降低主要发展中经济体的碳排放责任。王育宝等^[14]、王文治^[15]以区域间增加值贸易流动来设计分配因子实施碳排放责任共担,体现了“利益大,责任大”的分配原则。

针对消费责任原则计量方法存在的效率缺失问题,Kander等^[16]提出技术调整的消费责任原则,鉴于一国消费侧碳排放=生产侧碳排放-出口隐含碳+进口隐含碳,该计量方法将各国出口行业的实际碳排放系数用对应行业的全球平均碳排放系数来替代,如一国通过提升减排技术使各出口行业的碳排放系数显著低于全球各行业的平均碳排放系数时,调整后的该国出口隐含碳将显著增加,进而其消费侧碳排放责任大幅度下降,以此补偿其在提升减排技术上的努力。

此外,为了能更大程度减轻贸易隐含碳所引致的相关环境和社会影响,一些其他碳排放责任界定方法也逐渐发展起来,主要包括从要素驱动视角来界定区域碳排放责任的收入责任原则和以产品最终生产地来界定区域碳排放责任的生产者碳足迹原则。①收入责任原则。Marques等^[17]提出收入责任原则,该方法基于Ghosh投入产出模型,通过列向分解来测算区域增加值驱动的碳排放。丛建辉等^[18]研究发现,中国省域收入侧碳排放责任呈现从东到西递减的空间分布格局,采用收入责任原则能较好规避生产责任原则和消费责任原则的缺陷,是一种可行的碳排放责任核算方法。余晓泓等^[19]研究认为收入责任原则能够纠正生产责任原则的部分偏差,构建以收入责任原则为基础的碳排放责任核算体系,有利于建立更加公正和有效的碳减排方案。②生产者碳足迹原则。Ortiz等^[20]在计算跨国公司碳足迹研究中提出生产者足迹原则,该方法将全球价值链各生产环节上的碳排放记录在最终产品的生产地。与消费责任原则不同,生产者碳足迹将最终品出口引致的碳排放记录在生产地而非消费地;同时与生产责任原则不同,生产者碳足迹将最终品生产所需的中间品进口引致的碳排放记录在最终品生产地,而非进口中间品的实际生产地。该方法与

Wiebe^[21]提出的最终产品分配标准(Final Product-based Criterion)是一致的。

综上可知,首先,各种碳排放计量方法侧重角度不同,具有不同的优点和缺点,目前仍缺乏在统一测算框架下对其进行全面评估和比较的研究。其次,单一标准下的碳排放责任分配方法在研究视角上存在偏差,难以提供全面有效的碳排放信息。因此,从多维视角来综合界定区域碳排放责任,有助于制定更加精准的碳减排政策。尤其是在区域碳减排合作问题上,视角越多则可能产生的合作模式越为合理和广泛,可以有效减少碳转移问题对碳减排效率的冲击。最后,中国省域间贸易量显著高于同期的进出口总额^[15],省域间贸易引致的碳转移范围更广、规模更大。不同计量方法下界定的省域碳排放责任将存在更显著的差异,需要从公平和效率视角来深入评估各种碳排放责任计量方法的有效性,探索科学合理的省域碳排放责任界定方法。

针对上述问题,本文的主要创新贡献在于:①基于中国多区域投入产出表结构特征,运用经典MRIO模型将6种碳排放责任计量方法置于统一的测算框架下,同时保证各种碳排放计量方法所用的数据来源一致,便于评估和比较。②在公平视角下,采用环境基尼系数来比较6种计量方法的整体公平性,进一步采用相对剥夺指数来衡量不同计量方法下省域碳排放责任分配的个体公平感。在效率视角下,运用含非期望产出(Undesirable Outputs)

的基于松弛值测算(Slacks-Based Measure, SBM)的数据包络模型(Data Envelopment Analysis, DEA),简称为SBM-DEA模型,测算6种碳排放计量方法下各省域的碳排放效率。③基于各省域个体公平和碳排放效率测算结果,创新设计“一省一期,一票一分”的投票制度,通过各省域的客观理性投票来评估各种省域碳排放责任计量方法。④基于评估结果,从多维视角设计省域综合碳排放责任界定方法,并建议以此为基准实施省域间碳排放金额补偿,以促进省域间碳减排合作。

2 测算方法和数据处理

2.1 省域碳排放责任分配方法

省域碳排放责任计量方法主要从需求引致视角和要素驱动视角进行测度,图1显示了6种碳排放责任分配方法的特征和相互转化关系。在需求引致视角下以CBA为基准,各省域PBA下的碳排放量等于其CBA+需求引致的省域间净碳转移量(即:省域出口隐含碳-省域进口隐含碳);各省域SRA下的碳排放量等于其CBA+需求引致的省域间净碳转移量×分配因子;各省域TCBA下的碳排放量等于其CBA±技术补偿;各省域PFA下的碳排放量等于其CBA+省域出口隐含碳。在要素驱动视角下,各省域IBA下的碳排放量等于其PBA-增加值驱动的省域间净碳转移量。6种碳排放计量方法主要针对需求引致(或要素驱动)的省域间碳转移进行责任分配,理论上讲各种计量方法下的全国总碳

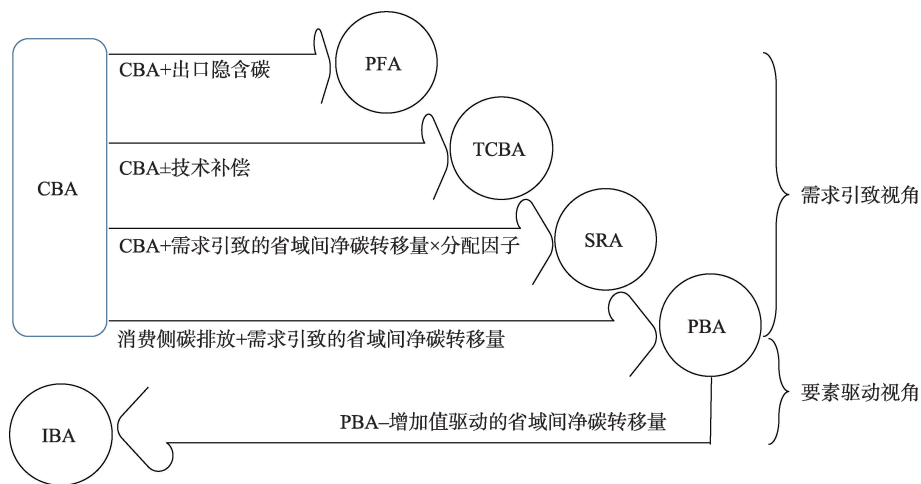


图1 6种碳排放责任分配方法的特征和相互关系示意图

Figure 1 Characteristics and interrelationships of six carbon emission responsibility allocation methods

排放量一定相等,然而各省域在不同计量方法下界定的碳排放责任则存在较大差异。具体的数理测算方法如下文所示。

2.1.1 省域生产侧和消费侧碳排放

根据里昂惕夫投入产出模型,中国 n 个省域 m 个行业之间行向的投入产出关系如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} X^{11} & X^{12} & \cdots & X^{1n} \\ X^{21} & X^{22} & \cdots & X^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X^{n1} & X^{n2} & \cdots & X^{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{11} & B^{12} & \cdots & B^{1n} \\ B^{21} & B^{22} & \cdots & B^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{n1} & B^{n2} & \cdots & B^{nn} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \cdots & Y^{1n} \\ Y^{21} & Y^{22} & \cdots & Y^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{n1} & Y^{n2} & \cdots & Y^{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} EX^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & EX^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & EX^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \varepsilon^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \varepsilon^n \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

式中: X 表示各省域分行业的总产出关系矩阵,其中的 X^{ij} 表示省域 j 最终需求引致的省域 i 各行业的总产出向量; B 表示省域间中间品部门完全消耗系数矩阵; Y 表示各省域最终品消费矩阵,其中的 Y^{ij} 表示从省域 i 各行业投入到省域 j 各行业的最终品向量; EX 表示各省域分行业的出口对角矩阵; ε 表示误差项对角矩阵^②。进一步定义各省域碳排放系数

$$\text{对角矩阵 } F = \begin{bmatrix} F^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F^n \end{bmatrix}, \text{ 则各省域碳排放}$$

关系矩阵如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} E^{11} & E^{12} & \cdots & E^{1n} \\ E^{21} & E^{22} & \cdots & E^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E^{n1} & E^{n2} & \cdots & E^{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X^{11} & X^{12} & \cdots & X^{1n} \\ X^{21} & X^{22} & \cdots & X^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X^{n1} & X^{n2} & \cdots & X^{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:省域间碳排放关系矩阵 E 的行向加总表示各省域各行业的生产侧碳排放,即 $PBA^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$ (以省

域 i 为例,下同),列向加总表示各省域各行业的消费侧碳排放,即 $CBA^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$ 。

2.1.2 省域收入侧碳排放

根据 Ghosh 投入产出模型,省域间列向投入产出关系如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} E^{11} & E^{12} & \cdots & E^{1n} \\ E^{21} & E^{22} & \cdots & E^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E^{n1} & E^{n2} & \cdots & E^{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & V^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & V^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} IM^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & IM^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & IM^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H^{11} & H^{12} & \cdots & H^{1n} \\ H^{21} & H^{22} & \cdots & H^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H^{n1} & H^{n2} & \cdots & H^{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: H 表示省域间中间品部门的完全分配系数矩阵, V 和 IM 分别表示各省域分行业的增加值和进口对角矩阵。式(3)中省域间碳排放关系矩阵 E 的行向加总表示各省域各行业的收入侧碳排放,即 $IBA^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$,列向加总表示各省域各行业的生产侧

碳排放,即 $PBA^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$ 。

2.1.3 省域生产者碳足迹

根据 Ortiz^[20]提出的国家生产者碳足迹方法,将全球价值链各生产环节上的碳排放记录在最终产品的生产地,则中国各省域的生产者碳足迹计算公式如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} E^{11} & E^{12} & \cdots & E^{1n} \\ E^{21} & E^{22} & \cdots & E^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E^{n1} & E^{n2} & \cdots & E^{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B^{11} & B^{12} & \cdots & B^{1n} \\ B^{21} & B^{22} & \cdots & B^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{n1} & B^{n2} & \cdots & B^{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{Y}^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{Y}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \hat{Y}^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\hat{Y}^i = \sum_{j=1}^n Y^{ji} + EX^i + \varepsilon^i$, 表示省域 i 所有最终品

② 误差项是为了平衡国内省域间投入产出数据,没有具体的经济含义。为了测算数据的完整,论文将误差项所引致的碳排放也纳入了核算体系。

2023年10月

的生产量(包含误差项),则省域间碳排放关系矩阵 E 的行向加总表示各省域各行业的生产侧碳排放,即 $PBA^i = \sum_{j=1}^n E^{ij}$,列向加总表示各省域各行业的生产者碳足迹,即 $PFA^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$ 。

2.1.4 责任共担下的省域碳排放

本文围绕省域生产侧和消费侧碳排放的责任共担进行测算,借鉴王文治^[15]的研究,首先计算省域最终品需求、出口和误差项引致的双边增加值流动如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} V^{11} & V^{12} & \cdots & V^{1n} \\ V^{21} & V^{22} & \cdots & V^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V^{n1} & V^{n2} & \cdots & V^{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & v^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & v^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} B^{11} & B^{12} & \cdots & B^{1n} \\ B^{21} & B^{22} & \cdots & B^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{n1} & B^{n2} & \cdots & B^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Y}^{11} & \hat{Y}^{12} & \cdots & \hat{Y}^{1n} \\ \hat{Y}^{21} & \hat{Y}^{22} & \cdots & \hat{Y}^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Y}^{n1} & \hat{Y}^{n2} & \cdots & \hat{Y}^{nn} \end{bmatrix}$$

式中:省域间双边增加值流动矩阵(V)中元素 V^{ij} 表示省域 i 各行业商品流出省域 j 各行业中包含的省域 i 的增加值,反之为 V^{ji} ;对角矩阵 v 中元素表示各省域分行业单位产出增加值。最终需求矩阵 \hat{Y} 为式(1)中省域最终品消费矩阵 Y 、省域出口对角矩阵 EX 和省域误差项对角矩阵 ε 之和。将省域间双边增加值流动矩阵中各元素 V^{ij} 实施工业加总后,基于“受益原则”,省域 i 和省域 j 之间的双边分配因子 $\theta^{ij} = \frac{V^{ij}}{V^{ij} + V^{ji}}$,即省域 j 最终需求引致省域 i 商品流出隐含增加值占全部两省域间商品流动隐含增加值的比重, θ^{ij} 越高表明两省域双边商品流动中隐含的省域 i 增加值占比较高(省域 i 获取了更高的贸易利益),按照“受益原则”应分配更多碳排放责任。通过省域间两两分配,省域 i 在责任共担原则下界定的碳排放可由式(6)计算。

$$SRA^i = E^{ii} + \sum_{j \neq i}^n [E^{ji} + \theta^{ij} \times T^{ij}] = CBA^i + \sum_{j \neq i}^n \theta^{ij} \times T^{ij} \quad (6)$$

式中: E^{ii} 表示公式(2)中省域 i 最终需求、出口和误

差项引致的本省域碳排放; E^{ji} 表示省域 i 最终需求、出口和误差项引致的省域 j 碳排放; $T^{ij} = E^{ij} - E^{ji}$,表示省域 i 净碳转移量,大于0表示省域 i 净碳流入,小于0表示省域 i 净碳流出。极端情况下当全部 $\theta^{ij} = 1 (j \neq i)$,表示省域 i 和所有其他省域的双边商品流动中,省域 i 获得了全部贸易利益,则责任共担后的省域 i 碳排放等于省域 i 生产侧碳排放;反之,当全部 $\theta^{ij} = 0 (j \neq i)$,即责任共担后的省域 i 碳排放等于省域 i 消费侧碳排放^③。根据式(6)定义可以看出,各省域责任共担后的碳排放量基本介于其生产侧碳排放和消费侧碳排放之间,体现了责任共担的思想。

2.1.5 技术调整下的省域消费侧碳排放

Kander等^[16]提出的TCBA方法未考虑国家间各行业碳排放系数差异以及国家间双边贸易量差异。事实上,双边贸易量较高的两个国家,如其中一国通过碳减排技术提升使两国各行业碳排放系数差异扩大,则两国间的双边贸易对全球碳减排的影响将更加显著,应按各国对全球碳减排的贡献来调整其消费侧碳排放责任。借鉴Dietzenbacher等^[12]所采用的反事实研究方法,假定省域间无贸易情景,此时省域 i 对省域 j 的商品流出将被省域 j 自行生产所替代,则反事实条件下省域 i 对省域 j 商品流出隐含碳(E_{NT}^{ij})需要用省域 j 各行业的碳排放系数来替代省域 i 各行业的碳排放系数, $E_{NT}^{ij} = F^j X^{ij}$,其中, X^{ij} 为公式(1)中省域 i 和省域 j 的商品流动关系。实施工业加总后,省域 i 实际商品流出对全国碳减排的贡献额如式(7)所示:

$$S^i = \sum_{j \neq i}^n (E^{ij} - E_{NT}^{ij}) \quad (7)$$

式中: $E^{ij} = F^i X^{ij}$,表示存在贸易条件下省域 i 对省域 j 商品流出隐含碳。当 $S^i < 0$ 表示省域 i 商品流出能减少全国碳排放, $S^i > 0$ 则增加全国碳排放。根据 S^i 的测算公式可以看出,如省域 i 通过提升减排技术使其各行业碳排放系数相对其他省域较低时, $S^i < 0$,相对于无贸易条件情景假设,省域 i 商品流出抑制了全国碳排放增加,需降低省域 i 的碳排放责

③ 具体测算时会出现下列两种情况:一是当 $T^{ij} > 0$ 时,此时 θ^{ij} 越大则省域 i 分配的碳排放量越高,体现了利益大,责任大的分配思路;二是当 $T^{ij} < 0$ 时,此时 θ^{ij} 越大则省域 i 分配的碳排放量越少,与受益原则相悖,则采用反向分配因子 $(1 - \theta^{ij})$ 来实施调节。

任以补偿其在提升减排技术上的投入。进一步 $S = \sum_{i=1}^n S^i$, 表示全国层面实际碳排放与无贸易条件下碳排放的差额, $S < 0$ 表示省域间贸易能降低全国碳排放。进一步假设 n 个省域商品流出中, l 个省域能减少碳排放, $(n-l)$ 个省域能增加碳排放。则商品流出能减少碳排放的省域 (i) 对全国碳减排的贡献率为 $W^i = S^i / \sum_{i=1}^l S^i$; 商品流出能增加碳排放的省域 (j) 对全国碳排放增加的贡献率为 $W^j = S^j / \sum_{j=1}^{n-m} S^j$ 。

最后, 根据各省域贸易行为减少 (或增加) 全国碳排放的贡献率, 对其消费侧碳排放实施调整, 如式 (8)-(9) 所示:

$$TCBA^i = CBA^i - |S| \times W^i \quad (8)$$

$$TCBA^j = CBA^j + |S| \times W^j \quad (9)$$

式中: CBA^i 表示省域 i 消费侧碳排放; $|S|$ 表示省域间贸易能降低 (或增加) 全国碳排放量的绝对值, 以此为基准来调整各省域的消费侧碳排放。其中, 省域 i 商品流出对减少全国碳排放的贡献率为 W^i , 调整后其消费侧碳排放责任下降 $|S| \times W^i$; 省域 j 商品流出对增加全国碳排放的贡献率为 W^j , 调整后其消费侧碳排放责任增加 $|S| \times W^j$ 。TCBA 充分考虑省域在减排技术上的投入, 有利于促进省域碳减排效率的提升。

2.2 省域碳排放责任分配方法的评估

2.2.1 公平视角评估

省域碳排放责任分配方法的公平性评估将分别采用整体上的环境基尼系数和个体上的相对剥夺系数来检验。根据基尼系数定义, 以 PBA 为例构建环境基尼系数, 测算公式如式 (10) 所示:

$$G_{PBA} = \frac{1}{2 \times 30^2 \times \mu} \sum_{j=1}^{30} \sum_{k=1}^{30} |E_j - E_k| \quad (10)$$

式中: 下标 j, k 均表示省域; E_j 和 E_k 分别表示省域 j 和省域 k 的生产侧碳排放量; μ 表示 30 省域生产侧碳排放量均值。同理, 可测算其他 5 种碳排放计量方法下的环境基尼系数, 以衡量 30 省域在 6 种碳排放责任计量方法下的整体公平性。

然而, 整体环境基尼系数难以细致刻画各省域在不同碳排放责任分配方法下的不公平感。如 Yit-

zhaki^[22]认为基尼系数可以用相对剥夺系数来解释, 在成对的收入比较过程中, 当低收入者发现其收入较低则产生被剥夺感 (劣势不平等), 进而可通过 Yitzhaki 指数来刻画研究对象之间的不公平感。借鉴 Yitzhaki 指数测度方法, 进一步构建 6 种碳排放责任计量方法下的省域碳排放相对剥夺指数, 以判定各省域在不同计量方法下界定的碳排放量所处的不公平程度。借鉴朱欢等^[23]的研究, 采用离差标准化方法消除量纲后, 各省域生产侧碳排放相对剥夺指数测算如式 (11) 所示:

$$D(E_i^{PBA}, E_j^{PBA}) = \begin{cases} \frac{E_i^{PBA} - E_j^{PBA}}{\text{Max}(E^{PBA}) - \text{Min}(E^{PBA})}, & E_i^{PBA} > E_j^{PBA} \\ 0, & E_i^{PBA} \leq E_j^{PBA} \end{cases} \quad (11)$$

式中: E^{PBA} 表示各省域生产侧碳排放向量, $E^{PBA} = (E_1^{PBA}, E_2^{PBA}, \dots, E_{30}^{PBA})$; 向量中元素为各省域的生产侧碳排放量; 标准化后省域 i 在整体参照群中的相对剥夺指数如式 (12) 所示:

$$D(E_i^{PBA}, E^{PBA}) = \frac{1}{30 [\text{Max}(E^{PBA}) - \text{Min}(E^{PBA})]} \sum_{E_i^{PBA} > E_j^{PBA}} (E_i^{PBA} - E_j^{PBA}) \quad (12)$$

式中: 省域 i 在生产责任原则下的相对剥夺系数 ($D(E_i^{PBA}, E^{PBA})$) 越高, 表示省域 i 在生产责任原则下分配的碳排放量相对其他省域越高, 其劣势不平等感越强。相反, 相对剥夺系数越低, 省域 i 的公平感越强, 其越倾向于选择 PBA 计量方法。同理, 可进一步计算其他 5 种碳排放责任计量方法下各省域的相对剥夺指数。

2.2.2 效率视角评估

省域碳排放效率测算基于非期望三阶段 SBM-DEA 模型, 该方法剔除了环境因素和随机误差的影响, 结果更为真实客观。第一阶段为初始效率评价。参考 Tone^[24]提出的 SBM 模型, 以各省域为决策单元, 在规模报酬可变条件下, 以本文 6 种计量原则下的省域碳排放量为非期望产出, 构建省域碳排放效率值测算模型。第二阶段, 参考 Fried 等^[25]的研究, 构建随机前沿模型 (Stochastic Frontier Approach, SFA), 以量化环境变量的影响程度 (环境变

2023年10月

量包括:产业结构,即第二产业产值占GDP比重;环境规制,即环境投资占GDP比重;技术进步,即技术市场成交额占GDP比重;政府干预程度,即政府财政支出占GDP比重)。在消除外部环境因素和随机因素的影响后,采用第二阶段调整后的投入变量,再次利用非期望产出SBM-DEA模型实施第三阶段的效率测算。因对环境因素与随机误差的筛选剔除,第三阶段的测算结果能够更客观准确地反映各省域的碳排放效率水平。

2.3 数据来源和处理

鉴于国内多区域投入产出表非逐年编制,本文选取刘卫东等^[26,27]编著的2007年和2010年中国30省区市30部门区域间投入产出表(因数据缺失,未包含港澳台和西藏地区数据)。为尽可能增加样本数量,本文同时选取中国碳核算数据库(Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADs)公布的2012年(原始版本1)、2015年和2017年多区域投入产出表。其中,2012年投入产出表分为30省域30部门,2015和2017年投入产出表分为31省域42部门(因数据缺失,未包含港澳台地区)。各省域分行业的碳排放数据来自CEADs发布的历年30省域47部门省级排放清单,具体测算方法见Shan等^[28]。为保证测算数据的一致性,在尽可能保留原有行业分类的基础上,本文将2007年、2010年、2012年、2015年和2017年的投入产出表与碳排放数据的行业分类实施匹配,最终生成5年30省域22行业投入产出数据及碳排放数据^④。

3 结果与分析

3.1 多维视角下的省域碳排放量

理论上6种碳排放计量方法下30个省域碳排放总量应相等,图2显示全国总碳排放量从2007年的6546.4 Mt,上升至2017年的9361.6 Mt,年均增速为3.9%,可以看出全国碳排放总量虽不断增加,但增速已大幅减缓,碳达峰趋势明显。2007—2012年碳排放总量年均增长速度为6.5%,随着“十二五”时期各省域对环境治理的力度不断加大,2012—2017

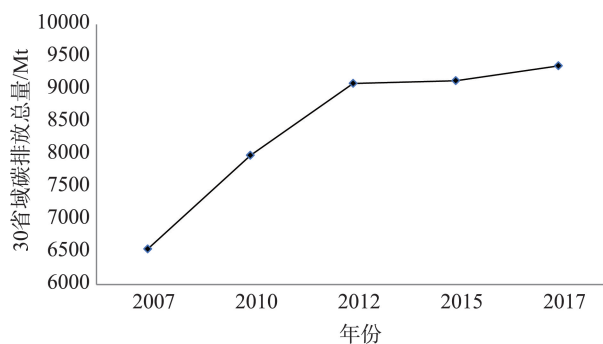


图2 2007—2017年中国碳排放总量变化

Figure 2 Trend of China's total carbon emissions, 2007–2017

年增长速度仅为0.5%。

表1显示了6种碳排放计量方法下2017年30省域的碳排放量^⑤。首先,2017年6种计量原则下的全国碳排放量一致为9361.6 Mt,说明本文构建的6种省域碳排放责任计量方法是合理的。其次,6种计量原则下碳排放量均较高的省域包括山东、江苏、广东、山西、河北、内蒙古、河南和浙江,8省域应是碳减排的重点地区^⑥。其中,山东、山西和内蒙古在IBA下的碳排放量最高;广东、浙江和河南在CBA下的碳排放量最高;江苏在PFA下的碳排放量最高;河北在PBA下的碳排放量最高。SRA和TCBA计量方法的测算结果相对折中。究其原因:PBA反映了省域内产品生产的全部碳排放,污染密集型产品生产多的省域生产侧碳排放较高;CBA反映了省域最终品需求引致的碳排放,出口和最终品消费高的省域消费侧碳排放较高;IBA反映了省域增加值驱动的碳排放,能源(例如煤炭)和重化工产品供给高的省域收入侧碳排放较高;PFA反映了最终品生产地引致的全部碳排放,出口和中间投入品需求高的省域生产者碳足迹较高;SRA和TCBA是对现有CBA和PBA计量方法的调整,其分配方式较为折中。最后,各省域在不同计量原则下界定的碳排放量存在显著差异,30省域在6种计量方法下碳排放量的最大值和最小值比值的均值为1.6。以北京为例,北京在PBA计量方法下的碳排放量为68.4 Mt,而在PFA下为230.9 Mt,比值高达3.4。鉴于此,各省域如何选择最优的碳排放责任计量方

④ 因篇幅所限,行业匹配结果未列出,详细行业匹配表备案。

⑤ 本文以2017年的测算数据为例,说明省域碳排放在不同计量方法下的差异性。

⑥ 根据测算结果,历年碳排放量较高的省域均为文中列出的8个省域,其他年份的详细测算数据备案。

表1 2017年6种碳排放计量方法下的各省域碳排放 (Mt)

Table 1 Provincial carbon emissions by six carbon emission measurement methods, 2017 (Mt)

省域	6种碳排放计量方法					
	PBA	CBA	IBA	PFA	SRA	TCBA
北京	68.4	201.0	146.3	230.9	130.6	105.9
天津	132.4	149.5	156.6	153.5	142.3	128.1
河北	685.9	505.0	565.6	525.3	627.5	552.1
山西	471.1	258.7	659.8	269.1	388.6	310.4
内蒙古	627.1	275.5	644.1	325.8	477.3	384.3
辽宁	461.5	307.8	447.3	390.2	400.8	351.9
吉林	197.9	167.3	188.4	169.5	190.7	169.2
黑龙江	259.1	245.8	256.6	189.2	247.2	275.9
上海	177.4	171.9	261.8	203.4	181.4	165.1
江苏	717.3	761.4	620.8	802.3	741.2	744.2
浙江	364.3	666.9	301.6	649.4	462.0	641.3
安徽	355.4	283.3	310.2	347.8	335.4	274.5
福建	224.5	173.4	248.3	181.7	206.1	151.7
江西	215.5	230.5	173.5	243.0	226.5	213.0
山东	774.9	649.8	876.6	589.6	720.6	632.0
河南	473.3	564.3	416.2	503.7	520.7	488.7
湖北	305.4	332.0	305.0	314.1	314.8	331.7
湖南	233.0	329.1	212.4	300.4	279.0	321.3
广东	501.1	927.0	513.4	852.1	679.3	879.7
广西	214.7	197.3	189.3	201.7	217.3	208.7
海南	40.7	38.4	32.9	61.7	41.4	38.5
重庆	148.5	235.3	140.9	312.0	191.3	229.4
四川	286.0	313.1	288.7	328.2	303.9	295.9
贵州	238.1	226.7	248.5	210.6	228.8	223.7
云南	183.9	290.8	168.4	243.2	208.6	288.1
陕西	250.4	293.8	304.0	278.7	269.0	303.1
甘肃	141.2	100.4	138.1	93.3	124.2	104.6
青海	49.8	55.9	45.2	51.3	50.1	56.4
宁夏	173.2	111.9	133.2	94.2	124.9	141.1
新疆	389.5	297.6	367.8	245.3	330.1	351.1
合计	9361.6	9361.6	9361.6	9361.6	9361.6	9361.6

法,需要进行全面客观的评估。

3.2 公平视角下的评估结果

根据式(10),6种计量方法下环境基尼系数的测算结果如表2所示。研究期间省域碳排放责任分配的环境基尼系数介于0.316~0.384之间,总体处于分配相对公平范围。其中,PFA下的环境基尼系数最高,5年均值为0.362;相反,SRA下环境基尼系数最小,5年均值为0.337。究其原因,PFA方法将省域出口隐含碳和进口隐含碳均计入最终品的生产地,相对生产责任原则和消费责任原则,其分配方

法更极端;相反,SRA采用省域间碳排放责任共担的分配方法,分配模式相对折中。从表1结果来看,各省域SRA下的碳排放量介于其PBA和CBA之间,分配结果显著缩小了省域间碳排放责任的差异,进而整体上该分配方法更凸显公平。此外,TCBA整体公平性与CBA基本一致,IBA在整体公平性上介于PBA和CBA之间。

环境基尼系数从整体上检验了30省域在6种计量方法下的责任分配公平程度,但具体到各省域时,整体责任分配最公平的SRA方法未必是最优选

2023年10月

表2 2007—2017年的6种碳排放计量方法下的环境基尼系数

Table 2 Environmental Gini coefficients under six carbon emission measurement methods, 2007–2017

年份	G_{PBA}	G_{CBA}	G_{IBA}	G_{PFA}	G_{SRA}	G_{TCBA}
2007	0.365	0.373	0.366	0.384	0.361	0.369
2010	0.356	0.348	0.350	0.372	0.347	0.346
2012	0.342	0.334	0.337	0.358	0.332	0.343
2015	0.341	0.316	0.340	0.362	0.317	0.309
2017	0.342	0.341	0.340	0.333	0.330	0.344
均值	0.349	0.342	0.346	0.362	0.337	0.342

择。各省域会根据每种计量方法下界定的碳排放量所获得的相对公平感,通过理性决策来选择最优的碳排放责任计量方法。根据式(12),计算出6种碳排放计量方法下各省域相对剥夺系数值(5年均值)的箱型分布(图3)。研究期间,6种碳排放计量方法下海南和青海碳排放相对剥夺系数几乎为0,无论在何种碳排放计量方法下两省域的相对公平感都最强。除上述两省域外,北京、广西、贵州、甘肃和宁夏等省域由于碳排放总量较低,在6种碳排放

放责任计量方法下的相对剥夺系数均值的中位数值(图3柱体中的黑实线)亦较低。相反,河北、山西、内蒙古、江苏、山东、河南和广东等省域由于碳排放总量较高,在6种碳排放责任计量原则下的相对剥夺系数均值的中位数值也较高。此外,部分省域在不同责任界定原则下的相对剥夺系数均值差异较大,例如河北、山西、内蒙古和广东等省域在6种碳排放计量方法下的相对剥夺系数均值的方差高于0.11(30省域的方差均值为0.04)。其中,山西

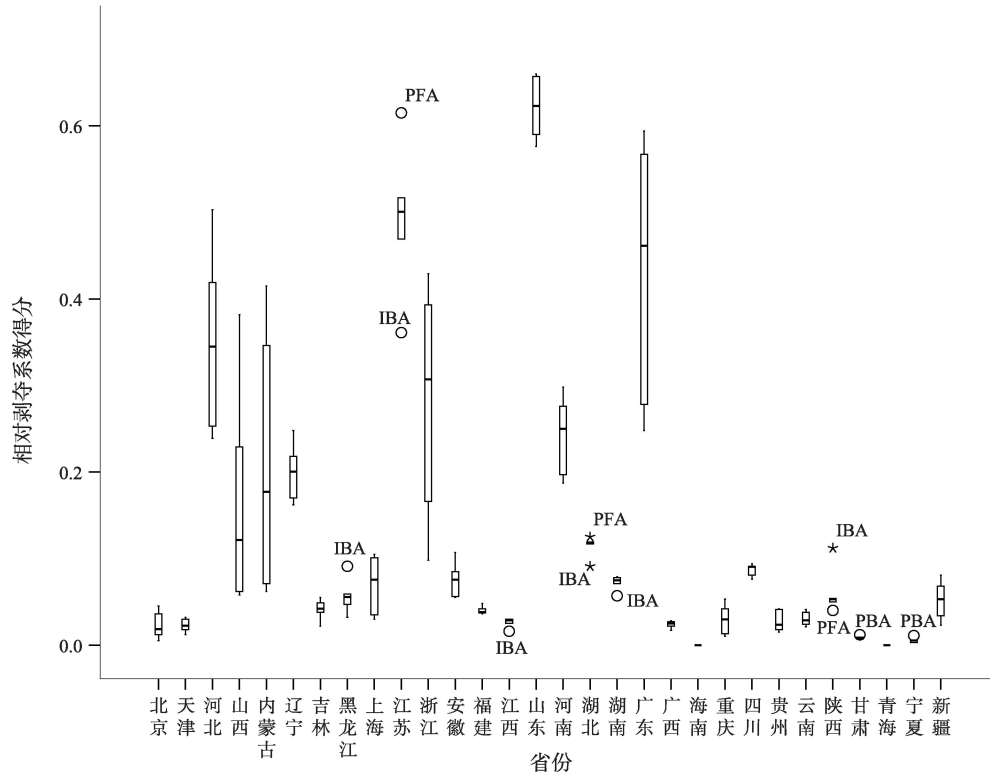


图3 6种碳排放计量方法下的各省域相对剥夺系数箱型图

Figure 3 Boxplot of relative deprivation coefficients of provinces under six carbon emission measurement methods

注:箱型图中上引线和下引线为省域在6中碳排放计量方法下相对剥夺系数的最大值和最小值,柱体的上下端为两个四分位值,柱体中的黑实线为中位数值,o和*为异常值并标注了对应的计量方法。下同。

在CBA下相对剥夺系数为0.062,按升序排列为第18位;在IBA下相对剥夺系数为0.382,按升序排列为第27位。鉴于各省域不同时期在6种碳排放责任计量方法下的个体公平感存在一定差异,难以确定个体公平性最优的碳排放责任计量方法,本文将设计一种投票制度,通过各省域历年在个体公平感上的客观理性投票来评估6种碳排放责任计量方法的优劣。

投票制度能通过集中多方意见,得出更加权威、准确和公平的结论,参与投票的个体本身均存在优势和劣势,通过投票综合多方意见能够扬长避短,最大程度减少误差。各省域基于自身相对剥夺系数的客观理性投票制度设计如下:首先,将历年6种碳排放计量方法下各省域的相对剥夺系数分别进行升序排列,则各省域会理性选择历年中相对剥夺系数排序靠前的碳排放计量方法,以实现自身相对公平感最强。其次,采用计分投票制,即:“一省一期,一票一分”的计分原则,得分最高的计量方法为最优,依次排序。设计该投票制度的原因在于:①鉴于本文研究对象为省域,则投票参与者设定为30省域;②为避免一期投票产生偏差,本文选取了2007、2010、2012、2015和2017年五期观测点进行投票;③采用简单多数规则进行计分,即:票数得分最高为最优。考虑到各省域在选择碳排放计量方法上应具有平等地位,且权重确定存在难度,进而未采用加权多数规则。在简单多数规则下,各省域每期均投票选择排序靠前的那种碳排放计量方法,每票1分。如遇到一期中某省域在两种以上的计量方法下排序位置相同,例如海南2007年在PBA、CBA、PFA、SRA和TCBA下相对剥夺系数均为0(排名第一),无法确定哪种碳排放计量方法最优,则采取平均分配分值的方法,即5种计量方法各得0.2分,合计1分。最后,将各省域在5个观测点上的投票结果进行统计,测算出各省域对6种碳排放计量方法的投票得分,最终计算出30省域在6种碳排放计量方法上的合计投票得分。根据上述投票规则,得分统计结果如表3所示。在个体公平视角下,SRA得分最低(9.09),与整体环境基尼系数评估结果相反,

说明整体上的分配公平在个体层面选择时并非最优;当各省域根据自身相对剥夺系数排序所处位置来进行理性投票时,IBA成为个体公平性投票的最优选择,得分为44.23;TCBA的得分高于CBA,为30.22,排在第二,说明经过技术调整后的TCBA计量方法在个体公平感上优于CBA;PFA虽分配方式极端,整体公平性较差,但个体公平性投票结果得分高于PBA和CBA。综上,投票结果表明,传统的PBA和CBA在公平性上均不是最优选择,同时CBA在公平性上略优于PBA,这与多数文献研究结论一致。

3.3 效率视角下的评估结果

基于DEA-SOLVER PRO工具,按照默认设定非期望产出与期望产出比为1:1,得出第一阶段6种计量原则下各省域碳排放效率值^⑦。进一步运用Frontier 4.1软件实施第二阶段SFA估计^⑧。总体来看,6种计量原则下每个投入的松弛变量的单边广义似然比检验结果(LR值)约为94.5,均通过了1%显著性水平,说明存在管理无效率项,采用SFA估计是合理的。各投入松弛变量的 γ 值介于0.77~0.98之间,表明管理无效率对省域碳排放效率的影响起着主导作用,分离环境因素和随机误差必不可少。绝大部分的环境变量对投入变量的影响均通过10%的显著性水平,说明环境变量的选取合理。环境变量回归系数为正,表明环境因素的增加将导致更多的冗余投入或更少的产出,会抑制碳排放效率的提升;相反,回归系数为负,表明环境变量有利于提升碳排放效率。最终在消除外部环境因素和随机因素的影响后,6种计量方法下各省域第三阶段碳排放效率5年均值的估计结果如图4所示。

研究期间,6种碳排放计量方法下,上海、湖南、广东、海南和青海的碳排放效率值均值为1,即无论在何种碳排放计量方法下,上述5省域的碳排放效率均最优。其中,海南和青海虽然GDP总量不高,但由于各种计量方法下的非期望产出(碳排放量)较低,仍呈现较高的碳排放效率。相对个体公平评估结果,6种碳排放计量方法下的省域碳排放效率排序相对稳定,除上述5省域外,北京、江苏、浙江、

⑦ 因篇幅所限,第一阶段碳排放效率值测算结果未列出,详细数据备案。

⑧ 因篇幅所限,第二阶段估计结果未列出,详细数据备案。

2023年10月

表3 2007—2017年各省域按相对剥夺系数投票选择碳排放计量原则的统计结果

Table 3 Statistical results of carbon emission measurement principles selected by voting according to the relative deprivation coefficients, 2007–2017

省域	各省域按相对剥夺系数进行投票的结果					基于投票结果测算的6种计量原则的得分					
	2007年	2010年	2012年	2015年	2017年	PBA年	CBA年	IBA年	PFA年	SRA年	TCBA年
北京	P	P/I	P	P	P	4.50		0.50			
天津	S	P	P	P	P	4.00				1.00	
河北	C	F	T	C/F/T	C/T	0.00	1.83	0.00	1.33	0.00	1.83
山西	F	F	T	T	T				2.00		3.00
内蒙古	C/T	F	T	T	T		0.50		1.00		3.50
辽宁	C/I/S/T	P/I	I	C/I/F/S/T	T	0.50	0.50	2.00	0.25	0.50	1.50
吉林	I	I	I	I	T			4.00			1.00
黑龙江	F/T	F	F	T	F				3.50		1.50
上海	I	I	I	P	C/S	1.00	0.50	3.00		0.50	
江苏	C/T	I	I	P/C	I	0.50	1.00	3.00			0.50
浙江	P/I	I	I	I	I	0.50		4.50			
安徽	C	T	C/T	I	C		2.50	1.00			1.50
福建	P/I	S	C/I/S/T	C	F	0.50	1.25	0.75	1.00	1.25	0.25
江西	I	F	I	C	I		1.00	3.00	1.00		
山东	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	I	F	C/F/T	0.33	0.66	1.33	1.66	0.33	0.66
河南	C/F/T	C/F/T	F	F	I	0.00	0.66	1.00	2.66	0.00	0.66
湖北	I	C/T	I	I	P/S	0.50	0.50	3.00		0.50	0.50
湖南	C	C/I	I	P	I	1.00	1.50	2.50			
广东	I	I	I	I	I			5.00			
广西	C/F/T	F	F	F	C/F/T	0.00	0.66	0.00	3.66	0.00	0.66
海南	P/C/I/F/S/T	P/C/I/S/T	P/C/S/T	P/I	P/C/I/S/T	1.35	0.85	0.90	0.20	0.85	0.85
重庆	I	C/I/S/T	T	I	I	0.00	0.25	3.25	0.00	0.25	1.25
四川	I/S/T	C/F/T	P	P/S/T	I	1.33	0.33	1.33	0.33	0.66	0.99
贵州	C/F/T	C/F/T	C/F/T	C	C/F	0.00	2.49	0.00	1.49	0.00	0.99
云南	F	T	F	I	I			2.00	2.00		1.00
陕西	C/F/T	T	P/F	F	P/S	1.00	0.33	0.00	1.83	0.50	1.33
甘肃	C/F/S/T	C/F/S/T	C/F/T	C/F/S/T	C/F/S	0.00	1.41	0.00	1.41	1.08	1.08
青海	I	F	I/F	C/F/S/T	F	0.00	0.25	1.50	2.75	0.25	0.25
宁夏	P/C/I/F/S/T	C/F/S/T	T	T	I/T	0.17	0.42	0.67	0.42	0.42	2.92
新疆	S	C/T	T	F/T	F/T	0.00	0.50	0.00	1.00	1.00	2.50
合计						17.18	19.89	44.23	29.49	9.09	30.22

注:表中大写字母分别代表6种计量原则英文缩写的首字母,其中PFA用字母F表示,以区别于PBA。下同。

福建和重庆的碳排放效率均值的中位数值(图4柱体中的黑实线)高于0.9,属于高碳排放效率省域;河北、山西、贵州和新疆的碳排放效率均值的中位数值低于0.6,长期锁定在较低水平。总体来看,东部和南部沿海发达省域的碳排放效率在不同计量原则下均较高,而中西部能源富集省域的碳排放效率较低。此外,部分省域在不同碳排放计量方法下的碳排放效率值差异较大,例如安徽、浙江、河南、四

川、贵州和甘肃等省域在6种碳排放计量方法下的省域碳排放效率均值的方差均高于0.05(30省域的方差均值为0.03)。其中,浙江在IBA计量方法下的碳排放效率历年均值排在第2位(碳排放效率值为1的并列排名第1位),在PFA(图4中显示为异常值)下排名第8位。鉴于各省域在不同碳排放计量方法下的碳排放效率值和排序位次存在一定差异,继续采用上文的投票制度来确定碳排放效率最优的计

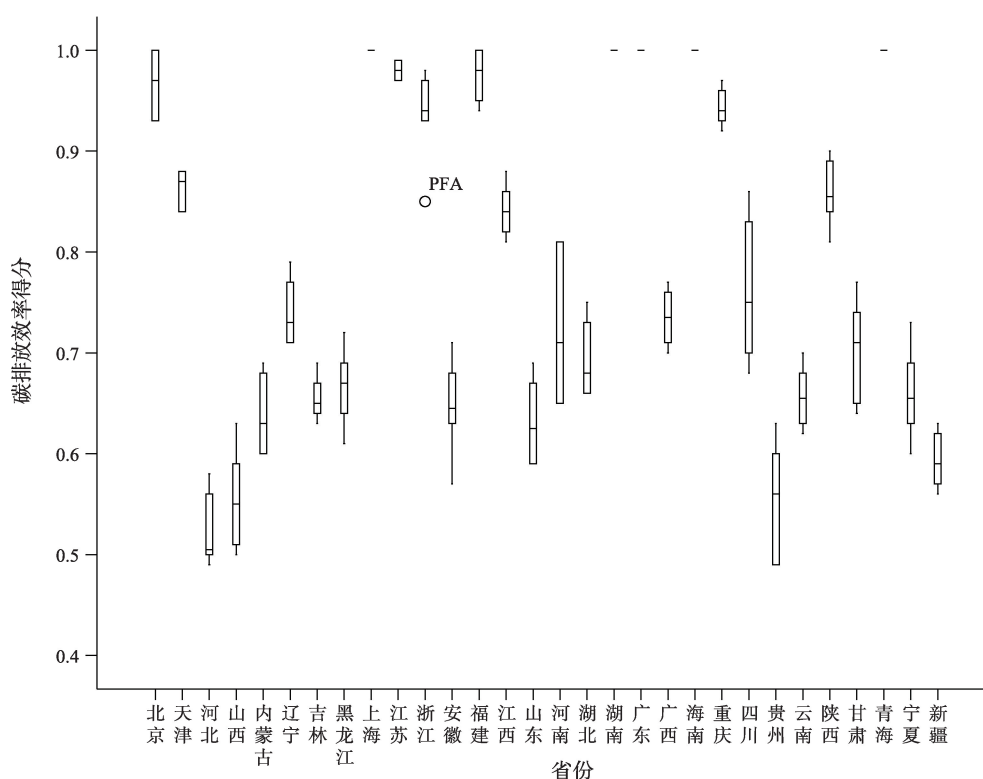


图4 6种碳排放计量方法下的各省域碳排放效率箱型图

Figure 4 Boxplot of provincial carbon emission efficiencies under six carbon emission measurement methods

量方法。

各省域历年6种碳排放计量方法的投票结果如表4所示,SRA得分仍最低(16.90)。说明整体上的分配折中反而会降低效率,不利于省域碳排放效率提升。相反,整体分配最不公平的PFA,在效率投票中反而得分最高(37.58),整体分配公平和碳减排效率提升存在一定矛盾。IBA碳排放效率投票得分为30.25,排名第二;TCBA得分为20.15,介于PBA和CBA之间。与多数学者研究结论一致,CBA计量方法在碳排放效率上高于PBA,然而无论PBA或是CBA在碳排放效率上均不是最优选择。

综合公平视角和效率视角的评估结果,传统的PBA和CBA计量方法在效率和公平上都不是最优。SRA计量方法侧重体现分配公平,却损失效率;PFA计量方法的碳排放效率最优,但分配方式过于极端,整体公平性欠缺。基于评估结果,IBA和TCBA计量方法在整体公平、个体公平和碳排放效率上相对折中合理。事实上,6种碳排放责任分配方法均基于不同视角,难免顾此失彼。鉴于此,下

文提出省域综合碳排放责任界定方法。

4 进一步分析

4.1 省域综合碳排放责任界定

综上研究结果,从整体公平视角看 $SRA > TCBA > CBA > IBA > PBA > PFA$,从个体公平投票结果看 $IBA > TCBA > PFA > CBA > PBA > SRA$,从碳减排效率看 $PFA > IBA > CBA > TCBA > PBA > SRA$ 。鉴于此,在界定省域碳排放责任时应综合考虑各类视角,借鉴杨超等^[29]的多原则综合加权分配方法,本文提出省域碳排放责任的综合界定方法,具体如下(以2017年为例):首先,综合评估分为3个视角,即总体公平视角、个体公平视角和碳排放效率视角,每个视角赋予1/3的权重。其次,每个视角下均包含6种碳排放计量方法,按照本文测算和投票结果实施排序,分别赋值1~6分,最优计量方法为6分。再次,采用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)构建判断矩阵,确定3个视角下6种碳排放计量方法的权重。最后,根据6种计量方法的综合权重及其对应省域的碳排放量实施加权平均,进而得出

2023年10月

表4 2007—2017年各省域按碳排放效率投票选择碳排放计量原则的统计结果

Figure 4 Statistical results of carbon emission measurement principles selected by voting according to carbon emission efficiency, 2007–2017

省域	各省域按碳排放效率进行投票的结果					基于投票结果测算的6种计量原则的得分					
	2007年	2010年	2012年	2015年	2017年	PBA	CBA	IBA	PFA	SRA	TCBA
北京	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/F/S/T	P/I/S/T	P/I/S/T	1.03	0.53	0.83	0.53	1.03	1.03
天津	I	F	P	F	P/C/I/F/S/T	1.17	0.17	1.17	2.17	0.17	0.17
河北	I	I	P/I/S/T	P/S	I	0.75	0.00	3.25	0.00	0.75	0.25
山西	P	C/T	P/C/I/F/S/T	P/I/S/T	C	1.42	1.67	0.42	0.17	0.42	0.92
内蒙古	C/F/T	F	F	F	P/I/F/S/T	0.20	0.33	0.20	3.53	0.20	0.53
辽宁	C/F/S/T	P/C/I/S/T	T	C/F	C	0.20	1.95	0.20	0.75	0.45	1.45
吉林	I	I	I	F	C/F	0.00	0.50	3.00	1.50	0.00	0.00
黑龙江	P/S	C/F/S	F/T	F	P/I/F	0.83	0.33	0.33	2.17	0.83	0.50
上海	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
江苏	I/S	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.67	0.67	1.17	0.67	1.17	0.67
浙江	I/S	P/I	I	C/S	I	0.50	0.50	3.00	0.00	1.00	0.00
安徽	P/I/S	S	C/F/S	P/I/S/T	C/I/T	0.58	0.67	0.92	0.33	1.92	0.58
福建	P/C/I/F/S/T	C/F/S/T	P/C/F/S/T	P/C/I/F/S/T	C/F/T	0.53	1.12	0.33	1.12	0.78	1.12
江西	P	F	I/F	P/C/I/F/S/T	I	1.17	0.17	1.67	1.67	0.17	0.17
山东	C/T	P/I	I/T	T	F	0.50	0.50	1.00	1.00	0.00	2.00
河南	C	T	I/T	T	T	0.00	1.00	0.50	0.00	0.00	3.50
湖北	P/I	C/I	I	P/I	C/F	1.00	1.00	2.50	0.50	0.00	0.00
湖南	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
广东	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
广西	C	F	F	P/S	P/C/F/S	0.75	1.25	0.00	2.25	0.75	0.00
海南	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
重庆	P/C/I/S/T	F	I	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.53	0.53	1.53	1.33	0.53	0.53
四川	C	C	P	C/S/T	C	1.00	3.33	0.00	0.00	0.33	0.33
贵州	F	F	F	P/S	P/I/F/S/T	0.70	0.00	0.20	3.20	0.70	0.20
云南	F	F	F	I	I	0.00	0.00	2.00	3.00	0.00	0.00
陕西	P	F	C/T	C	P/F/S	1.33	1.50	0.00	1.33	0.33	0.50
甘肃	F/T	F	F	C/T	F	0.00	0.50	0.00	3.50	0.00	1.00
青海	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	P/C/I/F/S/T	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
宁夏	P/C/I/F/S/T	P/I/F/S/T	C	C	I	0.37	2.17	1.37	0.37	0.37	0.37
新疆	I/F/S	F	P/C/I/F/S/T	C/F	P/F/S	0.50	0.67	0.50	2.33	0.83	0.17
合计						19.90	25.22	30.25	37.58	16.90	20.15

2017年各省域综合碳排放量。

层次分析法中的判断矩阵的CI值和CR值均为0.001,小于临界值0.1,说明构建的判断矩阵具有一致性,不存在逻辑矛盾。表5显示了层次分析法最终确定的6种碳排放计量方法的权重,结果显示:IBA和TCBA的权重最高,分别为0.220和0.205;PBA的权重最低为0.098,说明现有的PBA计量方法在整体公平、个体公平和碳排放效率3个维度上存在显著不足。

基于表5的综合权重,各省域2017年综合碳排放责任界定原则下的碳排放量如表6所示。2017年在综合碳排放责任界定原则下广东、江苏、山东、河北和浙江碳排放量较高,5省域合计碳排放量占全国碳排放的34.84%;海南、青海、甘肃、宁夏和天津碳排放量相对较低。相对目前采用的PBA计量方法,综合碳排放责任界定原则下广东、浙江、陕西、湖南、云南、重庆和北京等省域的碳排放量高于其生产侧碳排放,则上述省域在PBA计量方法下的碳

表5 AHP方法下确定的6种碳排放计量方法权重

Table 5 Weights of six carbon emission measurement methods determined by the AHP method

	总体公平视角	个体公平视角	碳排放效率视角	综合评估结果
PBA	0.098	0.098	0.098	0.098
CBA	0.190	0.144	0.190	0.175
IBA	0.144	0.281	0.236	0.220
PFA	0.050	0.190	0.281	0.174
SRA	0.281	0.050	0.050	0.127
TCBA	0.236	0.236	0.144	0.205

表6 2017年综合碳排放责任界定原则和生产责任原则下的省域碳排放量 (Mt)

Table 6 Provincial carbon emissions by the comprehensive responsibility approach and the production based approach, 2017 (Mt)

省域	综合碳排放责任计 量方法下的碳排放	PBA 计量方法下 的碳排放	差额	省域	综合碳排放责任计 量方法下的碳排放	PBA 计量方法下 的碳排放	差额
广东	739.9	501.1	-238.8	黑龙江	246.0	259.1	13.1
江苏	727.1	717.3	-9.8	云南	234.1	183.9	-50.2
山东	706.9	774.9	68.0	贵州	229.5	238.1	8.7
河北	564.9	685.9	121.1	江西	214.5	215.5	1.0
浙江	522.4	364.3	-158.0	重庆	212.5	148.5	-64.0
河南	491.1	473.3	-17.8	广西	202.9	214.7	11.8
内蒙古	447.9	627.1	179.1	上海	197.5	177.4	-20.1
山西	396.9	471.1	74.3	福建	196.1	224.5	28.4
辽宁	388.8	461.5	72.7	吉林	178.7	197.9	19.2
新疆	328.1	389.5	61.4	北京	152.7	68.4	-84.3
湖北	318.1	305.4	-12.7	天津	144.8	132.4	-12.4
安徽	312.3	355.4	43.1	宁夏	127.2	173.2	46.1
四川	303.0	286.0	-17.0	甘肃	115.4	141.2	25.8
陕西	287.9	250.4	-37.5	青海	51.5	49.8	-1.7
湖南	281.0	233.0	-48.0	海南	41.9	40.7	-1.2

排放责任被显著低估。反之,综合碳排放责任界定原则下山东、河北、内蒙古、山西、辽宁、新疆等省域的碳排放量低于其生产侧碳排放,PBA 计量方法下的碳排放责任被显著高估,进而承担了较高的碳排放责任。

4.2 省域间碳补偿设计

鉴于PBA 仍是当前主要的省域碳排放责任的计量方法,本文设计如下碳补偿机制来弥补现有PBA 计量方法的不足。以综合碳排放责任界定原则下的省域碳排放量为基准,对PBA 计量方法下被低估碳排放责任的省域按照一定的碳排放价格向被高估碳排放责任的省域实施金额补偿。2021年7月16日全国碳排放权交易市场启动上线交易,首笔碳交易价格为52.8元/t。可以此为参考价格,结合

表6中2017年综合碳排放责任界定原则和生产责任原则下的省域碳排放量的差额来计算省域间碳排放补偿金额。计算结果表明,2017年30省域间碳排放补偿金额合计384.27亿元,其中,广东、浙江、陕西、湖南、云南、重庆和北京7省域需要合计支付348.14亿元补偿金;相反,山东、河北、内蒙古、山西、辽宁、新疆6省域可合计获得292.79亿元碳排放补偿金,可用于提升其碳排放治理水平和降低碳减排成本。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文基于中国碳核算数据库(CEADs)发布的2007—2017年分省域行业碳排放数据,运用MRIO模型将生产责任原则、消费责任原则、收入责任原

2023年10月

则、生产者碳足迹、共担责任原则和技术调整的消费责任原则6种计量方法置于统一的测算框架下,并采用环境基尼系数、相对剥夺系数和非期望三阶段SBM-DEA模型,分别从整体公平、个体公平和碳排放效率三重视角对6种计量方法实施评估。研究表明:

(1)6种计量方法下全国碳排放总量均相等,进而验证了本文测算模型的准确性。全国碳排放总量虽不断增加,但2012年后增速已大幅减缓,呈现显著的碳达峰趋势。6种计量方法下碳排放量均较高的省域包括山东、江苏、广东、山西、河北、内蒙古、河南和浙江,是碳减排的重点省域。其中,2017年山东、山西和内蒙古在IBA下的碳排放量最高,广东、浙江和河南在CBA下的碳排放量最高,江苏在PFA下的碳排放量最高,河北在PBA下的碳排放量最高,不同计量方法下界定的省域碳排放量的确存在较大差异,且SRA和TCBA方法的测算结果相对折中。

(2)评估结果显示,SRA分配方法的整体公平性最强,而PFA分配方法较为极端其整体公平性最低;IBA分配方法在个体公平评估中投票得分最高;PFA分配方法在碳排放效率评估的投票中位列第一;现有生产责任原则和消费责任原则在公平和效率上均表现欠佳。

(3)基于评估结果,本文构建了省域综合碳排放责任原则计量方法。从界定的省域碳排放量看,综合碳排放责任原则下的高碳排放省域基本涵盖了6种原则下的高碳排放省域,起到了有效的甄别和筛选作用。从公平角度看,综合碳排放责任原则包含了整体公平和个体公平,并分别给予共担责任原则和收入责任原则较高赋权。从效率角度看,综合碳排放责任原则给予生产者碳足迹原则较高赋权。从整体赋权看,综合碳排放责任原则给予收入责任原则和技术调整的消费责任原则较高权重,而传统生产责任原则和消费责任原则权重较低,与评估结果一致。因此,采用多维视角下的综合碳排放责任界定方法更加科学合理。

5.2 政策建议

基于本文的研究结论,提出如下政策建议:

(1)从多维视角制定差异化的省域碳排放治理

政策。PBA计量方法下碳排放量较高的省域(如河北)应重点控制高能耗和高污染项目的生产规模,推动省域内重污染行业(钢铁、水泥等)全流程清洁化、循环化和低碳化改造。IBA计量方法下碳排放量较高的省域(如山西和内蒙古)除通过提升减排技术降低能源开采过程中的碳排放外,还应优化调整化石能源的供给结构,一是严格管控能源使用效率较低和环保不达标生产企业,减少这类企业的能源使用数量,促进能源类中间品更多流入清洁企业,优化能源供给结构。二是考虑通过税收减免或补贴形式鼓励优先供给下游的低碳企业,进而降低能源要素使用过程中的碳排放。CBA计量方法下碳排放量较高的省域(如广东和浙江),应促进其最终品消费和出口的低碳转型。一方面,应鼓励省域内企业增加对低碳投入品的需求比例,进而通过产业后向关联倒逼上游生产端企业向低碳产品生产转型;另一方面,建议加快实施产品碳足迹标签认证,当企业扩大低碳足迹产品生产时,应给予在能源类(如电力)中间品采购上一定的优惠和补贴,以鼓励企业向低碳足迹产品生产转型。PFA计量方法下碳排放量较高的省域(如江苏)应从需求侧和供给侧同时控制生产链各环节的碳排放。

(2)以省域综合碳排放责任计量方法为基准,实施省域间碳补偿。相对综合碳排放责任计量方法,现有生产责任原则计量方法给予河北、内蒙古、山西、辽宁、新疆、山东等能源和重化工产品输出型省域更高的碳排放责任,在赋予其更多碳减排任务的同时亦增加了环境治理成本,如环境治理费用完全由本省域承担,则增加其经济增长的负担。鉴于此,建议基于“受益者补偿”或“牺牲者付费”的碳补偿原则,根据文中表6的测算结果,鼓励生产责任原则计量方法下被低估碳排放责任的省域,通过财政横向转移支付,给予上述被高估碳排放责任的省域一定碳排放补偿金,用于其能源和重化工产品生产过程中的降碳治理,以碳补偿方式推进省域间碳减排合作。

(3)运用数字技术赋能构建高效碳核算体系。省域间碳补偿的实施需建立高效准确的碳排放核算体系。但碳核算对数据质量要求较高,中国企业数量庞大且地区发展不均衡,区域碳数据质量参差

不齐,碳排放核算体系不完善和国家碳排放核算结果权威性不强^[30]等问题并存,可借助数字技术构建高效准确的碳核算体系。近年来,随着人工智能、区块链、云计算和大数据等数字技术的发展,未来数字化技术将成为碳核算体系建设的根本保障,可以有效保障数据的完整性、保密性、安全性以及数据传输的效率,提高碳核算精度。

(4)建立碳减排合作试点区,先试先行探索跨省域碳补偿经验。2019年11月19日,国家发改委正式发布《长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案》明确提出在示范区内探索实施生态环境“三统一”制度和建立多元化生态补偿机制。参照长三角生态绿色一体化发展经验,建议将经济发展水平接近、地理位置接壤和双边碳转移流动高的省域合并构建碳减排合作试点区。例如京津冀地区和珠三角地区,试点区域内可打破省域间的行政壁垒,积极探索跨省域实施碳补偿的可行性和具体方式。

参考文献(References):

- [1] 张继宏,程芳萍. “双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 64–72. [Zhang J H, Cheng F P. Carbon emission reduction responsibility allocation in China's manufacturing industry under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 64–72.]
- [2] 张亚斌,陈强,元如芊. 供给侧改革下我国要素错配与碳排放效率研究[J]. 学术研究, 2017, (5): 79–85. [Zhang Y B, Chen Q, Yuan R Q. Research on factor mismatch and carbon emission efficiency in China under supply side reform[J]. Academic Research, 2017, (5): 79–85.]
- [3] 王安静,冯宗宪,孟渤. 中国30省份的碳排放测算以及碳转移研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(8): 89–104. [Wang A J, Feng Z X, Meng B. Measure of carbon emissions and carbon transfer in 30 provinces of China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2017, 34(8): 89–104.]
- [4] 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.]
- [5] 刘宏宣,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.]
- [6] 张文城,彭水军. 南北国家的消费侧与生产侧资源环境负荷比较分析[J]. 世界经济, 2014, 37(8): 126–150. [Zhang W C, Peng S J. A comparative analysis of resource and environment load from consumption side and production side between North and South countries[J]. The Journal of World Economy, 2014, 37 (8): 126–150.]
- [7] Liu Q L, Wang Q. Sources and flows of China's virtual SO₂ emission transfers embodied in inter provincial trade: A multiregional input-output analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 735–747.
- [8] Wiedmann T, Lenzen M. Environmental and social footprints of international trade[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(4): 314–321.
- [9] Creutzig F, Roy J, Lamb W F, et al. Towards demand-side solutions for mitigating climate change[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 260–263.
- [10] Zhang Z K, Zhang Z X, Zhu K F. Allocating carbon responsibility: The role of Spatial production fragmentation[J]. Energy Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104491.
- [11] Liu L. A critical examination of the consumption based accounting approach: Has the blaming of consumers gone too far?[J]. WIRE Climate Change, 2015, 6(1): 1–8.
- [12] Dietzenbacher E, Cazcarro I, Arto I. Towards a more effective climate policy on international trade[J]. Nature Communications, 2020, DOI: 10.1038/s41467-020-14837-5.
- [13] 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, 51(3): 137–150. [Peng S J, Zhang W C, Wei R. National carbon emission responsibility[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(3): 137–150.]
- [14] 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.]
- [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(6): 3–16. [Wang W Z. Recalculation of responsibility distribution of China's provincial consumption-side carbon emissions: Based on the perspectives of shared responsibility and technical compensation[J]. Statistical Research, 2022, 39(6): 3–16.]
- [16] Kander A, Jiborn M, Moran D D, et al. National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(3): 431–435.
- [17] Marques A, Rodrigues J, Lenzen M, et al. Income-based environmental responsibility[J]. Ecological Economics, 2012, 84(12): 57–

2023年10月

- 65.
- [18] 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.]
- [19] 余晓泓, 詹夏颜. 基于收益原则的碳排放转移及中国碳排放责任研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 185–194. [Yu X H, Zhan X Y. Analysis of carbon emissions transferred and China's carbon emissions responsibility based on the income principle[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 185–194.]
- [20] Ortiz M, López L A, Cadarso M A. EU carbon emissions by multinational enterprises under control-based accounting[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105104.
- [21] Wiebe K S. Identifying emission hotspots for low carbon technology transfers[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 243–252.
- [22] Yitzhaki S. Relative deprivation and the Gini coefficient[J]. Quarterly Journal of Economics, 1979, 93(2): 321–324.
- [23] 朱欢, 王鑫. 空气质量、相对剥夺与居民生活满意度[J]. 软科学, 2022, 36(2): 71–77. [Zhu H, Wang X. Air quality, relative deprivation and residents' life satisfaction[J]. Soft Science, 2022, 36(2): 71–77.]
- [24] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498–509.
- [25] Fried H O, Lovell C, Yaisawarng S. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17: 157–174.
- [26] 刘卫东, 陈杰, 唐志鹏, 等. 中国2007年30省市区区域间投入产出表编制理论与实践[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. [Liu W D, Chen J, Tang Z P, et al. Theories and Practice of Constructing China's Inter Regional Input-Output Tables between 30 Provinces in 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.]
- [27] 刘卫东, 唐志鹏, 陈杰, 等. 2010年中国30省市区区域间投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Liu W D, Tang Z P, Chen J, et al. A Multi-Regional Input-Output Table for 30 Provinces in China in 2010[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [28] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997–2015[J]. Scientific Data, 2018, DOI: 10.1038/sdata.2017.201.
- [29] 杨超, 吴立军, 李江风, 等. 公平视角下中国地区碳排放权分配研究[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1801–1813. [Yang C, Wu L J, Li J F, et al. Distribution of carbon emission rights in China based on equity perspective[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1801–1813.]
- [30] 李继峰, 郭焦锋, 高世楫, 等. 国家碳排放核算工作的现状、问题及挑战[J]. 发展研究, 2020, (6): 9–14. [Li J F, Guo J F, Gao S J, et al. Current status, issues and challenges of the national carbon emission accounting work[J]. Development Research, 2020, (6): 9–14.]

Comparison of carbon emission responsibility allocation methods and carbon compensation design among provinces in China

WANG Wenzhi^{1,2}, HU Yong³, ZHANG Xiaoyu²

(1. Collaborative Innovation Center for Emissions Trading System Co-constructed by the Province and Ministry, Wuhan 430205, China; 2. School of Economics, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. School of Economics, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: [Objective] With the deepening of domestic value chain division system, the flow of intermediate and final products between provinces leads to huge differences in provincial carbon emission responsibilities under different measurement methods. Finding a scientific and reasonable measurement method of regional carbon emission responsibility is an important prerequisite for promoting inter-provincial cooperation on carbon emission reduction. [Methods] Based on China's inter-provincial input-output data and carbon emissions data released by the Carbon Emission Accounts & Datasets, this study applied six measurement methods—production based approach, consumption based approach, shared responsibility approach, technology adjusted consumption based approach, producer footprint approach, and income based approach—to calculate provincial carbon emissions under a unified multi-regional input-output (MRIO) analytical framework, and designed a voting mechanism, that is, one vote for one period and one point for each province, to compare the six measurement methods from the perspective of fairness and efficiency. Based on the evaluation results, we designed the comprehensive responsibility approach, and constructed an inter-provincial carbon emission compensation system. [Results] (1) There are significant differences in the provincial carbon emissions defined by different measurement methods, and the principles of shared responsibility and consumption based responsibility adjusted by technology are relatively balanced. (2) From the perspective of overall fairness, the shared responsibility approach is the best; From the perspective of individual fairness, the income based responsibility approach is the optimal choice; From the perspective of carbon emission efficiency, the producer footprint approach is the optimal choice. The existing production based and consumption based responsibility approaches are not optimal choices from the perspectives of fairness and efficiency. [Conclusion] The comprehensive responsibility approach designed in this study is more compromising and reasonable. We propose to explore the experience of carbon emission compensation by using the comprehensive responsibility approach as the evaluation standard in the carbon emission reduction cooperation pilot areas.

Key words: carbon emission responsibility; MRIO model; fairness and efficiency; carbon emission compensation; relative deprivation; data envelopment analysis; China