

引用格式: 杨军, 贾倩, 丛建辉, 等. 基于“收支-责益”双平衡视角的中国省域碳补偿机制研究[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1265–1283. [Yang J, Jia Q, Cong J H, et al. Provincial carbon compensation mechanism in China based on the “revenue and expenditure-responsibility and benefit” dual balance perspective[J]. Resources Science, 2024, 46(7): 1265–1283.] DOI: 10.18402/resci.2024.07.03

基于“收支-责益”双平衡视角的中国省域碳补偿机制研究

杨军^{1,2}, 贾倩^{1,2}, 丛建辉^{1,2}, 杨泽^{1,3}

(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. 南开大学经济学院, 天津 300110)

摘要:【目的】为积极稳妥推进双碳目标并有效解决各省份碳不公平问题, 构建完备合理且易于实施的省域碳补偿机制至关重要。【方法】本文以2012—2030年为研究区间, 基于IPCC清单法、区域间双边碳转移测算模型和RAS法, 将区域内碳源碳汇关系(反映自然与生产因素差异)与跨区域贸易碳转移(反映经济与消费因素差异)纳入到统一碳补偿框架中, 引入“收支-责益”双平衡视角, 构建“补偿依据-补偿主体-补偿标准-补偿方式”的跨省域碳补偿理论框架, 探索与双碳目标及其减碳机制有效融合的省域碳补偿实现路径。【结果】①与以往视角相比(“收支”视角和“责益”视角), 承担贸易隐含碳排放量和碳汇量更多、区内碳排放量更少的省份在“收支-责益”双平衡视角下获得更多的补偿。②基于综合原则的配额补偿方案较公平优先和效率优先的配额补偿方案更适合纳入公平目标导向的碳补偿机制。③“历史补偿”期间(2012—2021年), 广东、浙江、北京和重庆为补偿额度最大的4个省份, 内蒙古、河北、新疆、黑龙江和山西为受偿额度最大的5个省份。④“未来补偿”期间(2022—2030年), 碳减排潜力较大的内蒙古、河北和山西等省份存在碳配额赤字, 单位碳排放产生经济效益较高的广东、福建、天津和上海等省份存在碳配额盈余。【结论】本文提出的基于“收支-责益”双平衡视角的碳补偿机制更具公平性和可操作性, 可作为中国省域碳补偿机制政策设计的重要参考, 并据此完善碳补偿机制的综合配套体系和开展试点工作。

关键词: 碳补偿机制; 多区域投入产出表; 双碳目标; IPCC清单法; RAS法

DOI: 10.18402/resci.2024.07.03

1 引言

为实现双碳目标, 中国各省份积极推进碳减排工作, 但部分省份面临减排增汇和经济效益难以协调的困境。如何处理好“发展和减排”“整体和局部”的关系, 是当前中国碳减排工作的关键和难点^[1]。党的二十大报告提出“促进区域协调发展”“积极稳妥推进碳达峰碳中和”, 强调不能为了目标实现牺牲部分省份的发展权利, 旨在缓解各省份在碳减排中的不公平现象。近年来, 国务院办公厅等相继印发《关于健全生态保护补偿机制的意见》《关

于深化生态保护补偿制度改革的意见》等重要政策文件, 提出“聚焦重要生态环境要素, 完善分类补偿制度”。生态补偿是缓解区域间生态不平等的重要制度安排, 将碳排放这一重要生态环境要素纳入到补偿体系中, 设计出促进各省份公平发展的碳补偿(Carbon Compensation)机制^[2], 可以提升国家实现双碳目标的效能。值得注意的是, 各省份碳减排的难度、代价、压力以及碳源碳汇情况存在较大差异。经济贸易活动还会导致碳泄漏、损益偏离等不公平现象的出现^[3,4], 这会对合理界定各省份的碳补偿角

收稿日期: 2023-10-21; 修订日期: 2024-03-19

基金项目: 国家社会科学规划基金项目(23BJL123)。

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, 教授, 研究方向为环境经济与政策。E-mail: congjianhui@sxu.edu.cn

色和计算碳补偿额度产生较大影响。因此,在兼顾公平性和可操作性的基础上,科学设计省域间碳补偿机制对积极稳妥实现双碳目标意义重大。

碳补偿概念源自生态补偿。生态补偿最先于20世纪60年代在研究生态服务功能价值时提出,随后经历了持续演化,在20世纪90年代被应用于碳减排领域^[5],并形成碳补偿相关理论。碳补偿与生态补偿理论基础在一定程度上具有一致性,其理论渊源可追溯至庇古税和科斯定理,基于外部性、公共产品、生态资本、环境正义等理论^[6],均建构于受益者支付原则^[7]。也有文献认为,因碳补偿与森林、湿地等具有明确损益关系的生态补偿形式不同^[8],碳补偿与生态补偿的主体特征、驱动因素和应用范畴等存在差异,其概念内涵仍需进一步规范^[9]。

碳补偿机制的实现包括界定补偿主客体和确定补偿标准。现有研究中,碳补偿主体主要涉及4种类型:①森林、农业、旅游等领域^[10];②重点区域和经济带,如京津冀、长江经济带、黄河流域等^[11];③省份内部的生态功能区^[5],如浙江、河南等;④省域之间^[12]。补偿标准是碳补偿机制的核心,现有文献主要基于4种视角确定补偿标准,即新增碳汇价值^[13]、支付者补偿意愿^[14]、碳收支平衡^[15,16]和共担原则^[17,18],其中,新增碳汇价值根据碳汇的变动情况确定碳补偿额度;支付者补偿意愿综合影响支付者支付意愿的因素,如经济状况、环保意识等,以确定补偿额度;碳收支平衡根据碳排放量和碳汇量的相对大小确定补偿额度;共担原则根据贸易增加值收益关系将省份间的贸易隐含碳排放责任进行分解进而确定碳补偿额度。相关研究从理论层面推进了碳补偿机制的制度设计进程,但上述视角未将自然与生产因素引致的本区域源汇关系和经济与消费因素驱动的跨区域贸易转移关系纳入补偿标准内,在考虑影响区域不公平因素的全面性和可操作性方面有待提升。

现有关于双碳目标背景下碳补偿实现路径的研究涉及到两个层面。①与政策实践的结合。在国际上,《京都议定书》确定的CDM机制率先开启全球碳补偿实践^[19];在中国,《中国碳平衡交易框架研究》较早提出建立国家碳补偿制度。不过,现有研究^[20]多数聚焦于核算方法且仅列出补偿数字,与国家减碳目标及减碳机制的结合尚不充分,且鲜有

文献提出面向具体减碳目标的操作方案。②补偿方式的确定。相关研究^[21]多以政策建议的形式,主要从政府和市场两方面提出补偿模式,对多元化补偿方式的探索仍待深入。

综上所述,现有关于碳补偿机制的研究取得了积极进展,但省域碳补偿机制的整体性理论框架仍有完善空间,与国家双碳目标及其减碳机制的结合有待加强。鉴于此,本文构建省域间碳补偿机制理论框架;计算并比较2012、2015和2017年“收支”视角、“责益”视角和“收支-责益”双平衡视角下各省份的碳补偿额度;对2022、2025和2027年各省份资金补偿和配额补偿方式的补偿情况进行分析和对比;设计双碳目标背景下碳补偿的实现路径。以期探索更具公平性、科学性和可操作性的碳补偿机制,促进各省份积极稳妥推进碳达峰碳中和目标,实现区域间均衡发展。

相较于以往研究,本文可能的研究贡献在于:①在理论框架方面,将自然与生产因素引致的本区域源汇关系和经济与消费因素驱动的跨区域贸易转移关系置于统一框架内,构建“补偿依据-补偿主体-补偿标准-补偿方式”的跨区域碳补偿机制;②在研究视角方面,从“收支-责益”双平衡视角出发,一方面将跨区域贸易引致的隐含碳排放责任及增加值贸易收益关系纳入研究视角,另一方面将跨区域碳源碳汇的溢出效应纳入研究视角,进一步体现机制设计的区域间公平性;③在实现路径方面,基于碳补偿标准核算结果,与国家双碳战略具体目标和减碳机制相结合,提高补偿机制的可操作性。

2 中国省域间碳补偿机制理论框架

在以往研究的基础上,本文基于外部性等理论,按照“谁受益,谁补偿”的原则划分补偿主客体,引入“收支-责益”双平衡视角核算补偿量,通过配额补偿和资金补偿两种方式实现省份间补偿,构建如图1所示的中国省域间碳补偿机制理论框架。

(1)补偿依据。基于外部性理论,碳排放量和碳汇量是不具有排他性的公共产品,分别具有负外部性和正外部性。碳排放随着贸易活动在各省份间流动,且中国各省份产业结构、资源禀赋和碳源碳汇量存在差异,各省份减少碳排放量和增加碳汇量的边际成本^[22,23]及经济收益不一致。为解决外部

2024年7月

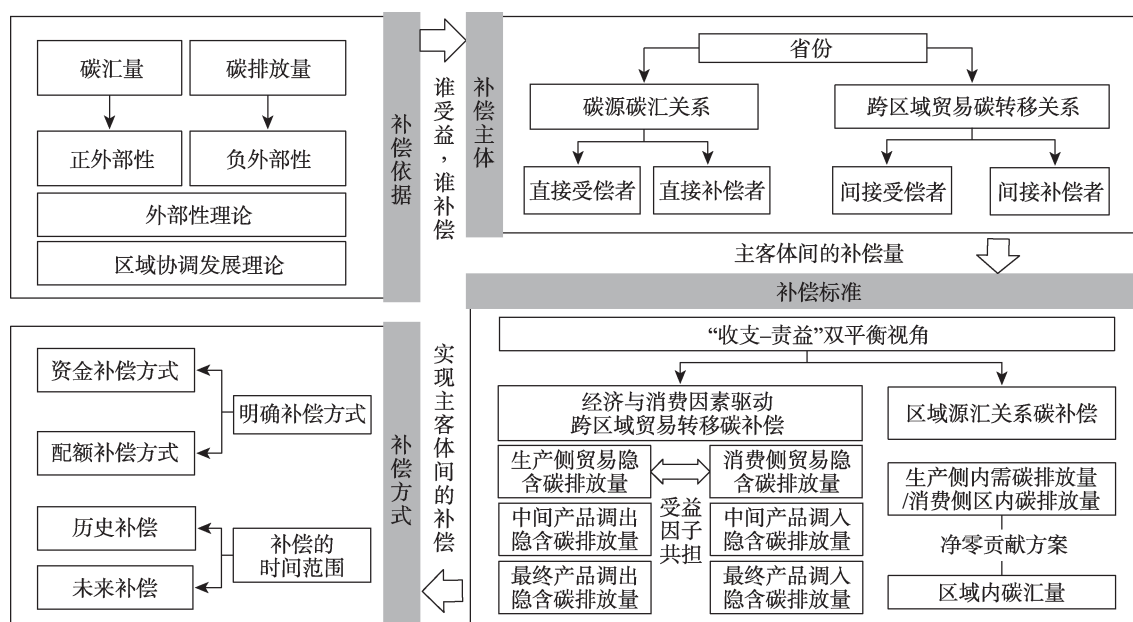


图1 “补偿依据-补偿主体-补偿标准-补偿方式”的跨区域碳补偿机制

Figure 1 The cross-regional carbon compensation mechanism of “compensation basis-compensation subject-compensation standard-compensation method”

性问题并促进区域间协调发展,利用科斯定理,明晰各省份碳排放量和碳汇量的产权,通过补偿机制提升减碳效能。

(2)补偿主体。根据“谁受益,谁补偿”的原则进行省份间主客体的划分,考虑应当承担和实际承担碳排放责任间的偏离情况。将补偿主体称为补偿者,补偿客体称为受益者。根据区域碳源碳汇补偿关系将补偿主客体划分为直接补偿者和直接受益者,根据跨区域贸易转移补偿关系将补偿主客体划分为间接补偿者和间接受益者。

(3)补偿标准。补偿标准是省份间碳补偿机制的核心。省份间净碳转移量差异较大且呈现增长态势,贸易活动使得经济收益与碳排放责任间偏离现象愈加严重。将区域源汇关系和贸易引致的跨区域碳转移纳入“收支-责益”双平衡视角,可设计出公平合理的省域碳补偿机制。

(4)补偿方式。采用资金补偿和配额补偿两种方式进行“历史补偿”和“未来补偿”,以实现省份间碳补偿。资金补偿是将补偿标准与碳价相乘得出补偿额,并通过转移支付实现。配额补偿方式的实现包括碳预算补偿和市场补偿两个步骤。碳预算补偿是指各省份在碳预算的基础上增加(或减少)

“收支-责益”双平衡视角下的补偿量;市场补偿是比较各省份实际碳排放量和补偿后的碳预算,通过市场销售多余的碳额度(或者购买不足的碳额度)。由于现有碳预算分配方案主要遵循公平优先、效率优先及兼顾公平效率3个原则^[24,25],后文将对上述3个原则下的配额补偿方式,选择最符合本文理念的方案。考虑提升现有碳补偿机制的可操作性和所需数据的可得性,选择“未来补偿”和“历史补偿”两个时间维度进行补偿,“历史补偿”的时间范围为2012—2021年,“未来补偿”的时间范围为2022—2030年。

3 研究方法与数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 碳汇量计算模型

碳汇量主要由植被、湿地和农作物产生,其中,植被主要包括森林、园地和草地,农作物主要包括稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、棉花、花生和油菜籽。碳汇量的计算公式如下:

$$CA_r = \sum H_i NEP_i + QR + \sum C_j Y_j / S_j \quad (1)$$

式中: CA_r 为 r 省的碳汇量; H_i 为第 i 种($i=1, 2, 3$ 分别表示森林、园地和草地)植被的碳吸收系数,森林、草地和园地的碳吸收系数分别为3.81、0.948和2.38; NEP_i 为第 i 种植被的碳吸收系数; R 和 Q 分别

为湿地的碳吸收系数和面积; Y_j 为第 j 种农作物的经济产量; C_j 和 S_j 为第 j 种农作物的碳吸收系数和经济系数(表1)。

表1 主要农作物碳吸收系数和经济系数

Table 1 Carbon uptake coefficient and economic coefficient of major crops

农作物	碳吸收系数	经济系数
稻谷	0.414	0.450
小麦	0.485	0.400
玉米	0.471	0.400
豆类	0.450	0.340
薯类	0.423	0.700
棉花	0.450	0.100
花生	0.450	0.430
油菜籽	0.450	0.250

3.1.2 区域间双边碳转移测算模型

生产侧碳排放量核算生产活动所引致的碳排放量,消费侧碳排放量核算各省份由于消费活动所引致的碳排放量。在经济全球化背景下,国际分工日益深化和资本的自由流动导致越来越多产品的生产和消费出现地域性分离,生产的不同阶段也被分散在世界不同的地区。生产侧碳排放核算方法规定一国(地区)生产活动导致的碳排放责任完全由该国(地区)承担,不考虑生产的产品和服务所引致的碳转移量。因此该方法缺乏公平性,且会增加生产成本并导致碳泄漏和污染避难所效应^[26]。消费侧碳排放量核算方法考虑贸易活动所产生的碳转移,但在实际操作中,该方法需要核算贸易中的隐含碳排放量,增加计算结果的不确定性^[27]。

本文参考王育宝等^[28]构建的区域间双边碳转移测算模型,将碳排放量与多区域投入产出表相结合,计算并分解生产侧和消费侧碳排放量。该模型有助于科学界定各省份应承担的碳排放量,为设计公平合理的碳补偿机制奠定数据基础。

多区域投入产出表横向加总得出下列恒等式:

$$X_r = \sum_{s=1}^m A_{rs} X_s + \sum_{s=1}^m Y_{rs} + EX_r \quad (2)$$

式中: X_r 为省份 r 总产出; m 为省份总数; A_{rs} 为省份 r 消耗的来自省份 s 中间品的投入产出系数矩阵(或直接消耗系数矩阵); Y_{rs} 为省份 r 对省份 s 投入的最终需求; EX_r 为省份 r 出口矩阵。

省份 r 生产侧碳排放 CE_r^{producer} 计算公式如下:

$$CE_r^{\text{producer}} = f_r L_{rr} Y_{rr} + f_r L_{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^m A_{sr} X_s + \quad (3)$$

$$f_r L_{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^m Y_{rs} + f_r L_{rr} EX_r$$

式中: $L = (I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵; f_r 为 r 省份的碳排放系数; $f_r L_{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^m A_{sr} X_s$ 为中间产品调出隐含碳; $f_r L_{rr} Y_{rr}$ 为 r 省份内需碳排放量; $f_r L_{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^m Y_{rs}$ 为最终需求调出隐含碳; $f_r L_{rr} EX_r$ 为出口隐含碳。

省份 r 消费侧碳排放 CE_r^{consumer} 计算公式如下:

$$CE_r^{\text{consumer}} = f_r L_{rr} Y_{rr} + \sum_{s=1, s \neq r}^m f_s L_{ss} A_{sr} X_r + \quad (4)$$

$$\sum_{s=1, s \neq r}^m f_s L_{ss} A_{sr} Y_{sr} + f_r L_{rr} IM_r$$

式中: IM_r 为 r 省份进口列向量; $f_r L_{rr} Y_{rr}$ 表示区内排放; $\sum_{s=1, s \neq r}^m f_s L_{ss} A_{sr} X_r$ 为中间产品调入隐含碳; $\sum_{s=1, s \neq r}^m f_s L_{ss} A_{sr} Y_{sr}$ 为最终需求调入隐含碳; $f_r L_{rr} IM_r$ 为进口隐含碳。

3.1.3 RAS法

RAS法(Row Arrange Series Method)是英国著名经济学家Richard Stone最初提出的^[29]。由于投入产出表的不同区域间具有一致性约束,RAS法可据此预测未来年度多区域投入产出表,具体方法如下:

首先,采用插值法得出中间年度总产出、总投入、进口和出口的数据,利用时间序列模型预测未来年度总产出、总投入和进出口的数据。

进而,利用RAS法构建未来年度中间流量矩阵。已知2017年投入产出表,未来年度(g 年)中间投入矩阵计算的具体步骤为:①根据中间流量矩阵和总产出矩阵得到直接消耗系数矩阵 A 。②利用 g 年度总产出矩阵和直接消耗系数矩阵 A 计算中间流量矩阵。③根据 g 年度中间使用和中间投入矩阵,迭代调整中间流量矩阵,直到收敛。④采用同样的方法得出投入产出表中其他区域的矩阵,将预测结果和预期的宏观数据进行比较以验证预测的合理性。

3.1.4 “收支”“责益”和“收支-责益”双平衡视角的计算

(1)“收支”视角下碳补偿量的计算方法

“收支”视角遵循碳收支平衡原则,根据各个省

2024年7月

份碳汇量和碳排放量的相对大小确定补偿量,其中,收指碳吸收量,即碳汇量,支指碳排放量。根据中国的现实情况,碳中和目标仍是远景目标,据此“收支”视角采用净零贡献方案核算碳补偿量。“收支”视角下 r 省份碳补偿量(CC_r^{RE})计算公式如下:

$$CC_r^{\text{RE}} = \left(\frac{Q_r}{Q_t} - \frac{q_r}{q_t} \right) |Q_t - q_t| \quad (5)$$

式中: CC_r^{RE} 上标 RE 表示收支 (Revenue-Expenditure); Q_r 和 Q_t 分别表示 r 省份和全国的碳汇量; q_r 和 q_t 分别表示 r 省份和全国的碳排放量。

(2)“责益”视角下碳补偿量的计算方法

“责益”视角遵循贸易收益越大承担责任越多原则,根据各省份贸易中获得的收益共担各省份间的净碳转移量,其中,责是指贸易引致的碳排放责任,益是指贸易获得的收益。

参考 Koopman 等^[30]的研究,构建省域间贸易增加值模型,计算各省份在贸易中获得的收益,进而计算“责益”视角下的碳补偿量。

定义矩阵对角元素加总为省份 r 总流出的本地增加值(DV_r),矩阵中除对角元素以外元素加总为省份 r 总流出中其他省份的增加值(OV_r),计算公式如下:

$$Z_r = \sum_{s=1, s \neq r}^m Z_{rs} = \sum_{s=1, s \neq r}^m (A_{rs} X_s + Y_{rs}) \quad (6)$$

$$V \times L \times Z = \begin{pmatrix} V_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & V_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & V_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \cdots & L_{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \times L_{11} \times Z_1 & V_1 \times L_{12} \times Z_2 & \cdots & V_1 \times L_{1m} \times Z_m \\ V_2 \times L_{21} \times Z_1 & V_2 \times L_{22} \times Z_2 & \cdots & V_2 \times L_{2m} \times Z_m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ V_m \times L_{m1} \times Z_1 & V_m \times L_{m2} \times Z_2 & \cdots & V_m \times L_{mm} \times Z_m \end{pmatrix} \quad (7)$$

受益因子(a_{rs})计算公式如下:

$$a_{rs} = \frac{DV_{rs}}{DV_{rs} + OV_{rs}} \quad (8)$$

“责益”视角下 r 省份的碳补偿量(CC_r^{RB})计算公式如下:

$$CC_r^{\text{RB}} = \sum_{s=1, s \neq r}^m a_{rs} (f_s L_{ss} A_{sr} X_r + f_s L_{ss} A_{sr} Y_{sr} - f_r L_{rr} A_{rs} X_s - f_r L_{rr} Y_{rs}) \quad (9)$$

(3)“收支-责益”双平衡视角下碳补偿量计算方法

“收支-责益”双平衡视角将跨区域贸易引致的隐含碳排放责任及增加值贸易收益关系和跨区域碳源碳汇的溢出效应纳入研究视角,实现碳源碳汇补偿与跨区域贸易转移碳补偿间的平衡。其中,收代表碳吸收量,支代表区内排放量(或内需碳排放量),指本区域生产且消费的碳排放量;责代表贸易引致的碳排放责任,益代表贸易获得的收益。考虑到省份的地理环境、维度海拔等自然环境因素与碳汇量高度相关,省份增加碳汇量的难度较大,故源汇关系碳补偿赋权重为0.3,跨区域贸易转移碳补偿赋权重为0.7。“收支-责益”双平衡视角下省份 r 碳补偿量($CC_r^{\text{RE-RB}}$)计算公式如下:

$$CC_r^{\text{RE-RB}} = 0.7 \sum_{s=1, s \neq r}^m a_{rs} (f_s L_{ss} A_{sr} X_r + f_s L_{ss} A_{sr} Y_{sr} - f_r L_{rr} A_{rs} X_s - f_r L_{rr} Y_{rs}) + 0.3 \left(\frac{Q_r}{Q_t} - \frac{f_r L_{rr} Y_{rr}}{\sum_{i=1}^{30} f_i L_{ii} Y_{ii}} \right) \left| Q_t - \sum_{i=1}^{30} f_i L_{ii} Y_{ii} \right| \quad (10)$$

式中:上标 RE-RB 代表收支-责益 (Revenue Expenditure-Responsibility Benefit); $f_r L_{rr} Y_{rr}$ 和 $f_i L_{ii} Y_{ii}$ 分别为 r 省份和全国的区内排放(或内需碳排放量)。

3.2 数据来源及处理

本文选取中国30个省份(因数据缺失,不包括西藏和港澳台地区)为研究对象,利用碳排放、碳吸收、投入产出表和宏观经济4个方面的数据,设计2012—2021年的碳补偿方案并预测2022—2030年数据以设计该期间的碳补偿方案。2012—2021年省级碳排放清单来源于 CEADs 数据库 (<https://www.ceads.net.cn/data/province/>)^[31-34]。2022、2025和2027年各省份预测的碳排放量数据来源于 DPEC 中国未来排放情景数据库 (<http://meicmodel.org.cn>)^[35], 选取由 SSP4-60 能源经济情景和 BAU 当前污染控制政策情景组合而成的 Baseline 情景,通过插值法计算未来中间年度各省份碳排放量;2010—2020年省级林地、森林、湿地和农作物面积等相关数据来自《中国统计年鉴》;2012、2015和2017年中国多区域投入产出表来源于 CEADs 数据库 (<https://www.>

ceads.net.cn/data/input_output_tables/)^[36], 2018年非竞争型投入产出表来自国家统计局;省级人口数、实际GDP和固定资本存量的数据来源于《中国统计年鉴》和各省统计年鉴,省级能源消费量来源于《中国能源统计年鉴》;中国碳排放权交易市场的交易价格来源于上海环境能源交易所,考虑到各省份碳排放权交易价格不相同,2012—2021年度的碳价采用平均价格。考虑到未来年度碳价预测的不确定性,未来年度的碳价采用2022年全国碳市场的平均价格(56.07元/t)。

考虑到研究需要,本文基于CEADs数据库中投入产出表和碳排放清单的部门类别,根据《国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)》,将部门聚合为22个部门,具体部门类别见表2。

4 结果与分析

4.1 中国各省份生产侧碳排放量、消费侧碳排放量和净碳转移量分析

2012年、2015年和2017年中国碳排放总量分别为9742.70 MtCO₂、9831.55 MtCO₂和10171.21 MtCO₂,呈逐年增长态势。中国各省份生产侧、消费侧及净碳转移总量呈现不同的结构特征(图2),部分省份的碳排放量处于净碳流出状态,在碳减排中处于有利地位,净碳流入省份在碳减排中处于不利地位,且省份间的碳不公平性正在加剧。碳排放生产侧与消费侧大省可分为3类。第1类,以江苏、广东、山东为代表的东部沿海经济大省。此类省份双侧排放均较高,在国内外经济贸易中分别充当需求方与供给方,存在大量零部件及中间产品交易产生的调入隐含碳,同时又因为其外贸规模较大,大量产品及服务用于对外出口供给其他国家,存在着净碳排放流出;第2类,以河北、内蒙古、山西为代表的能源重化工产业集聚省份。此类省份生产侧碳排放量较高而消费侧碳排放量较低,以能源产业和原材料工业为支柱产业,向下游输出能源和高碳初级原材料;第3类,以北京、上海为代表的直辖市。其消费侧碳排放量较高而生产侧碳排放量较低,第三产业占比较高,交通运输业与金融业等服务业发达,大量产品来自于其他省份,在国内贸易中主要充当购买者的角色。上海和北京是自给碳排放占比最低的2个省份,分别占比8.22%和19.34%。从

表2 中国多区域投入产出表部门分类

Table 2 Classification of sectors of China's multi-regional input-output table

代码	部门类别	代码	部门类别
1	农林牧渔产品和服务	16	其他制造产品
2	煤炭采选产品		废品废料
	石油和天然气开采产品		金属制品、机械和设备修理服务
	金属矿采选产品	17	电力、热力的生产和供应
	非金属矿和其他矿采选产品		
3	食品和烟草	18	燃气生产和供应
4	纺织品		水的生产和供应
5	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	19	建筑
6	木材加工品和家具	20	交通运输、仓储和邮政
7	造纸印刷和文教体育用品	21	批发和零售
8	石油、炼焦产品和核燃料加工品		住宿和餐饮
9	化工产品	22	信息传输、软件和信息技术服务
10	非金属矿物制品		金融
11	金属冶炼和压延加工品		房地产
12	金属制品		租赁和商务服务
13	通用设备		科学研究
	专用设备		技术服务
14	交通运输设备		水利、环境和公共设施管理
15	电气机械和器材		居民服务、修理和其他服务
	通信设备、计算机和其他电子设备		教育
	仪器仪表		卫生和社会工作
			文化、体育和娱乐
			公共管理、社会保障和社会组织

结构来源来看,各省份碳排放主要来源于内需碳排放量和中间产品调入调出隐含碳。2012年,30个省份平均内需碳排放量占比接近50%。中国各省份中间产品调入调出隐含碳排放量占比在8.36%~82.41%之间。最终需求调入调出隐含碳排放量占比在1.21%~53.20%之间。从年际变化来看,在2012—2017年期间,最终需求调入隐含碳与中间产品调入隐含碳增长幅度明显,分别增加12.39%和9.04%,与省际互补型贸易增加和流通性增强有关。

2012年、2015年和2017年中国净碳转移总量为3012.51 MtCO₂、3185.70 MtCO₂和3504.85 MtCO₂,净碳转移总量逐年增加。净碳转移方向主要从华南和华东地区转入西北、华北和东北地区。山西、内蒙古、河北和山东为重要的净碳转入省份,净碳转入量在各年份均超过200 MtCO₂。广东、上海、

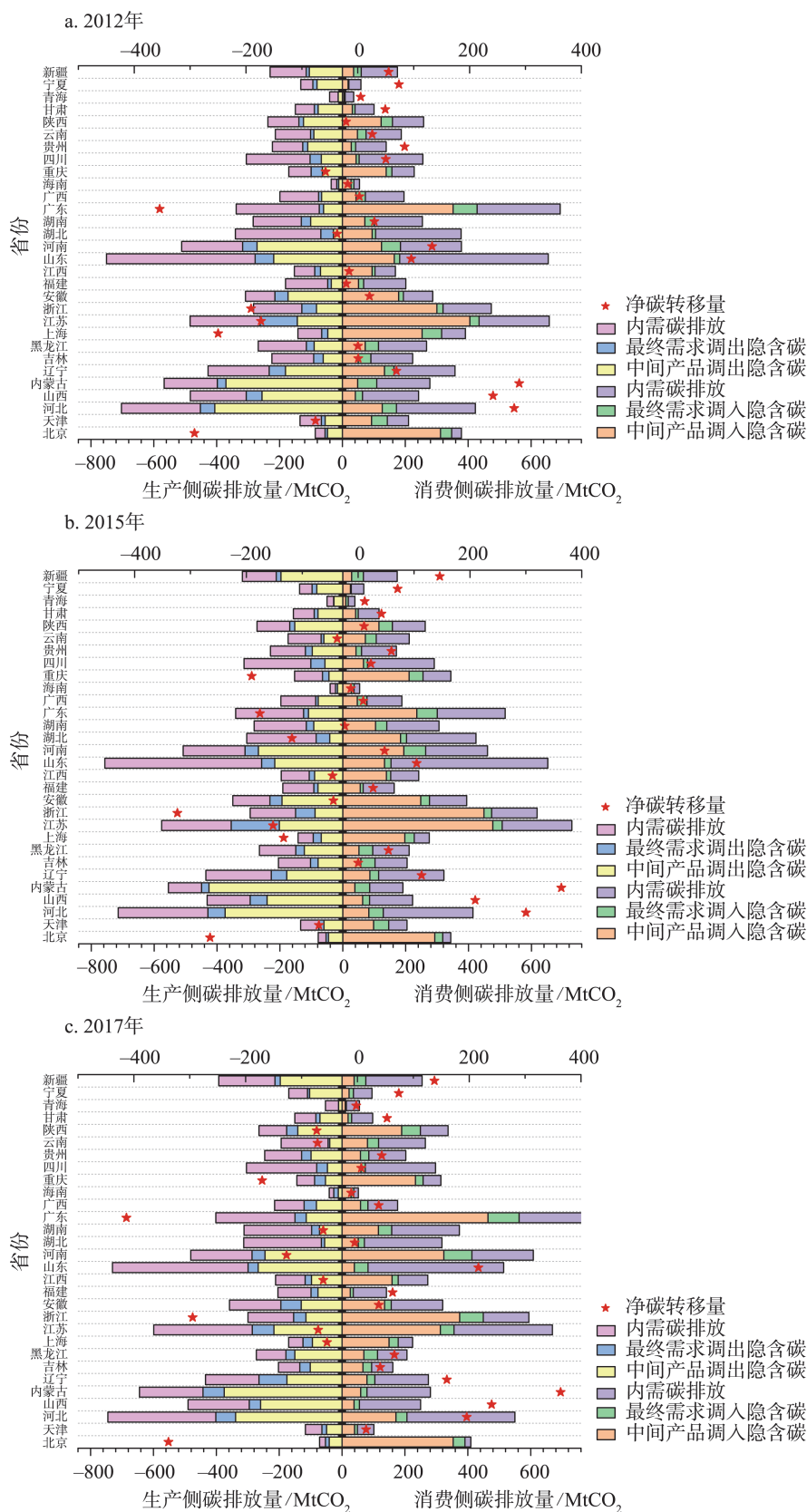


Figure 2 Production-side carbon emissions, consumption-side carbon emissions, and net carbon transfers by province in China in 2012, 2015, and 2017

浙江和北京为重要的净碳转出省份,净碳转出量在各年份均超过 200 MtCO₂。2012年,净碳转入省份为内蒙古、河北、山西和辽宁等 18 个省份,主要分布于东北、华北、西南和西北地区。其中,内蒙古为净碳转入最大的省份,净碳转移量为 288.75 MtCO₂,占全国比重约为 11%。净碳转出省份为广东、江苏和上海等 12 个省份,主要分布于华南地区和华东地区。其中,浙江为净碳转出最大的省份,净碳转移量为 354.51 MtCO₂,占全国比重约为 10%。由于中间产品调出和调入隐含碳的变化,部分省份的碳转移关系发生了重大变化。其中,2015年,陕西和福建由净碳转出省份变为净碳转入省份,安徽、云南和湖南由净碳转入省份变为净碳转出省份;2017年,天津、福建和黑龙江由净碳转出省份变为净转入省份,青海、云南、湖南和河南由 2012 年的净碳转入省份变为净碳转出省份。

4.2 “收支”“责益”和“收支-责益”双平衡视角下中国各省份碳补偿量的比较分析

“收支”视角和“责益”视角是现有碳补偿机制文献的补偿标准,“收支-责益”双平衡视角是本文提出的补偿标准。将补偿金额最大的省份排序设为第 1,随着补偿额度的降低和受偿额度的增加,各省份的排序逐级下降。3 类视角下,中国各省份碳补偿量排序变化情况如表 3 所示。

对比 2012 年“收支”视角,在“收支-责益”双平衡视角下各省份的排序,呈现净碳转出类省份排序上升、净碳转入类省份排序下降的规律,碳减排中处于不利地位的省份获得更多补偿。河北、山西和辽宁等 9 个省份的排序下降,可分为 3 类情况。第 1 类,以山西和河北为代表的资源型省份。此类省份以能源开采及其相关产业为主,承担大量外输能源所产生的碳排放量;第 2 类,以河南和山东为代表的制造业省份。此类省份在省际间进行大量的贸易活动,进行加工和再加工以满足其他省份的经济活动;第 3 类,以江苏为代表的排序相对变动省份,江苏碳排放量较多且碳汇量较少,但所需承担的贸易隐含碳排放在全国中的排序低于“收支”视角下的排序,因此排序也呈现下降现象。除河北等 9 个省份排序下降以外,剩余省份的排序上升,可分为 2 类。第 1 类,以北京、上海和天津为代表的发达地

区,消费活动依赖于购买其他省份生产的产品,产品流入所引致的碳排放量被其他省份所承担;第 2 类,以广西、江西、陕西、海南和福建为代表的损益偏离省份,该类省份共担后的碳排放量大于实际承担的碳排放量。2015 年贵州和陕西的排序未发生变化,福建由净碳转出省份变为净碳转入省份,故其排序呈下降趋势。2017 年河南由净碳转入省份变为净碳转出省份,故其排序呈上升趋势。

比较 2012 年“责益”视角,在“收支-责益”双平衡视角下各省份的排序,呈现碳汇量较多的省份排序下降、区内碳排放量较高省份排序上升的规律。各省份排序变化整体幅度较小,广东、浙江、天津、福建、海南和陕西的排序没有发生变化,北京、河南和内蒙古等 15 个省份排序下降,剩余省份排序上升。内蒙古、黑龙江、河南、湖南和吉林的碳汇量在全国处于前列,北京、甘肃和江西等省份区内碳排放量较少,“收支-责益”双平衡视角下获得更多的补偿,排序呈现下降现象。山东、辽宁、宁夏、湖北和山西等省份的区内碳排放量较多,上海、天津、宁夏等省份的碳汇量较少,在“收支-责益”双平衡视角中付出更多的补偿,呈现排序上升现象。2015 年江苏、安徽和江西排序上升,湖北排序下降,其他省份较 2012 年排序变化差异不大。2017 年辽宁排序下降,江苏和安徽的排序上升,其他省份较 2012 年排序变化差异不大,各省份排序变化情况符合上述规律。

部分省份在“收支”“责益”和“收支-责益”3 类视角下角色不同,呈现承担贸易隐含碳排放量和碳汇量更多、区内碳排放量更少的省份在“收支-责益”双平衡视角下获得更多的补偿。对比 2012 年“收支”视角,在“收支-责益”双平衡视角下承担贸易隐含碳排放量越多且获得经济利益越少省份获得的补偿量越多。海南和陕西等净碳转出省份在“收支-责益”双平衡视角下变为补偿者。宁夏、辽宁、贵州、安徽、山西、河南和河北等净碳转入省份在“收支-责益”双平衡视角下变为受偿者。2015 年和 2017 年宁夏等省份由于净碳排放量的转移方向发生变化,“收支-责益”双平衡视角下角色发生变化。对比 2012 年“责益”视角,在“收支-责益”双平衡视角下,区内碳排放量越少且碳汇量越多的省份

2024年7月

表3 2012、2015和2017年3个视角下各省份碳补偿量及排名情况

Table 3 Carbon compensation and rankings of provinces from three perspectives in 2012, 2015 and 2017

省份	2012年				2015年				2017年									
	“收支”视角		“收支—责益” 双平衡视角		“收支”视角		“责益”视角		“收支—责益” 双平衡视角		“收支”视角		“责益”视角		“收支—责益” 双平衡视角			
	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名	碳补偿结果	排名		
北京	-53.81	13	-187.95	2	-64.79	3	-47.88	12	-118.95	1	-86.12	2	-43.30	12	-78.66	3	-56.89	3
天津	-97.92	8	-40.58	7	-37.52	7	-95.79	8	-30.08	8	-29.96	7	-81.20	10	1.56	16	-6.94	12
河北	-301.58	1	232.83	30	88.91	29	-307.47	2	141.62	30	76.39	29	-309.68	2	81.27	28	26.32	24
山西	-272.97	4	155.53	28	45.31	27	-222.45	4	59.16	26	30.17	25	-264.28	3	68.43	27	26.91	25
内蒙古	387.86	30	207.66	29	150.90	30	394.92	30	139.72	29	163.58	30	361.13	29	120.99	30	143.01	30
辽宁	-160.75	5	54.90	25	9.21	18	-167.26	5	61.07	27	25.00	24	-143.34	5	63.25	26	35.87	27
吉林	109.10	24	-5.83	14	3.82	17	125.52	24	-6.20	12	7.00	16	159.94	24	13.11	21	31.70	26
黑龙江	337.03	29	-0.37	16	33.25	25	343.35	29	13.51	21	45.07	28	378.07	30	15.45	22	58.16	29
上海	-110.97	6	-173.43	3	-73.46	2	-110.14	7	-82.32	4	-65.54	4	-133.81	7	-4.09	14	-10.73	10
江苏	-274.80	3	-67.81	5	-43.83	6	-332.41	1	21.91	24	-9.96	10	-347.59	1	6.05	18	-37.64	6
浙江	-104.56	7	-115.66	4	-62.81	4	-110.64	6	-111.58	2	-90.53	1	-114.79	8	-89.80	2	-75.41	2
安徽	-57.57	12	19.34	20	20.09	22	-83.80	10	11.27	19	7.15	17	-77.84	11	16.06	23	4.47	17
福建	-0.90	17	-22.67	9	-23.25	9	-1.41	17	19.60	23	11.79	22	-12.51	16	19.15	24	10.75	19
江西	81.16	21	-21.85	10	1.02	13	43.73	21	-27.53	9	-14.58	8	34.84	21	-28.48	7	-14.83	9
山东	-300.50	2	72.72	26	-14.49	10	-304.46	3	80.16	28	0.04	14	-249.09	4	94.02	29	24.61	23
河南	-39.07	15	111.07	27	58.91	28	-29.73	14	52.61	25	40.55	27	22.30	20	-12.84	10	-0.03	15
湖北	-74.45	10	-33.92	8	-51.37	5	-25.67	16	-49.96	5	-51.29	6	-29.38	14	-13.68	9	-30.15	7
湖南	3.48	18	12.50	18	3.15	16	9.53	19	-11.89	11	-13.45	9	-11.46	17	-38.34	6	-39.83	5
广东	-92.88	9	-253.68	1	-154.05	1	-84.96	9	-47.85	6	-52.02	5	-134.68	6	-114.04	1	-104.88	1
广西	107.62	23	-7.78	13	1.75	15	122.22	23	-0.44	16	8.50	20	113.11	23	5.15	17	17.43	22
海南	8.05	19	-17.63	11	-8.96	11	12.35	20	-15.80	10	-9.59	11	12.41	19	-10.36	11	-4.94	14
重庆	-50.84	14	-47.99	6	-29.01	8	-32.15	13	-96.73	3	-73.94	3	-24.86	15	-69.61	4	-49.11	4
四川	218.78	26	22.71	21	27.70	24	208.33	26	9.46	18	15.93	23	238.45	27	-4.43	13	8.55	18
贵州	-34.55	16	44.83	24	12.25	19	-27.15	15	11.48	20	4.54	15	-33.32	13	8.20	20	2.33	16
云南	253.72	27	7.75	17	26.91	23	296.92	28	-36.56	7	-0.13	13	296.37	28	-56.74	5	-17.96	8
陕西	19.78	20	-12.92	12	-1.86	12	0.23	18	5.75	17	7.89	18	9.67	18	-24.17	8	-8.80	11
甘肃	86.60	22	16.03	19	19.63	21	82.25	22	-1.38	14	8.41	19	91.37	22	7.12	19	15.78	21
青海	189.09	25	-1.15	15	18.95	20	190.18	25	-3.54	13	9.09	21	193.91	25	-7.10	12	12.98	20
宁夏	-71.29	11	29.93	23	1.23	14	-73.78	11	-0.77	15	-3.76	12	-100.09	9	0.41	15	-6.45	13
新疆	297.11	28	23.42	22	42.41	26	227.63	27	14.26	22	39.78	26	199.66	26	32.12	25	45.72	28

付出更多的补偿。山东的区内碳排放量是全国第一,在“收支-责益”双平衡视角下变为补偿者。黑龙江、吉林和青海碳汇量处于全国前列,在“收支-责益”双平衡视角下变为受偿者。2015年和2017年,因山东的区内碳排放量和碳汇量相对大小发生改变,其在“收支-责益”双平衡视角下变为受偿者。

4.3 不同补偿方式下中国各省份碳补偿结果分析

以往文献采用资金补偿方式实现省份间的碳补偿,本文将碳补偿机制与碳预算分配方案相结合得到配额补偿方式。考虑到现有3种碳预算分配方案,故先选择可以促进省份公平发展的碳预算分配方案,在此基础上分析各省份的碳补偿情况。为对比资金补偿方式和配额补偿方式,选取2022、2025

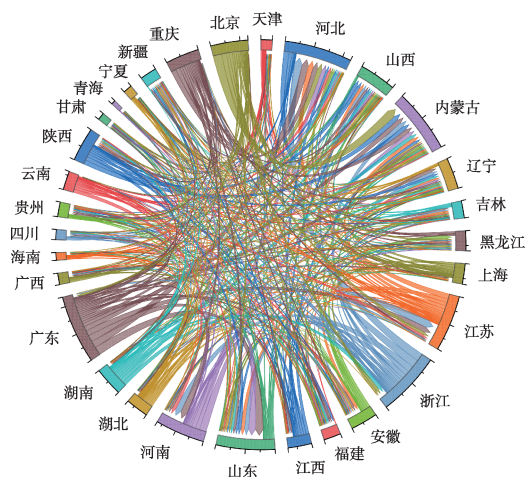
和2027年3年分别分析2种补偿方式下各省份的碳补偿结果。

4.3.1 资金补偿方案

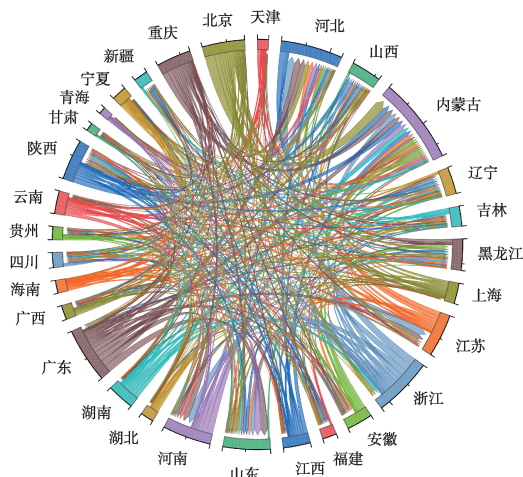
在资金补偿方案中,省域间碳补偿情况如图3所示。在贸易中处于不利地位的省份为受偿者,包括净碳转入省份和碳汇量较高的省份。在贸易中处于获利地位的省份为补偿者,包括贸易中转出隐含碳排放量较多、碳汇量较低、区内碳排放量较高的省份。2022年、2025年和2027年中国资金补偿的总额分别为569.32亿元、565.02亿元和572.71亿元,补偿总额变化幅度较小。

2022年中受偿省份为内蒙古、河北、山西、广西等15个省份,主要分布于华北、东北、西南和西北地

a. 2022年中国各省份资金补偿情况



b. 2025年中国各省份资金补偿情况



c. 2027年中国各省份资金补偿情况

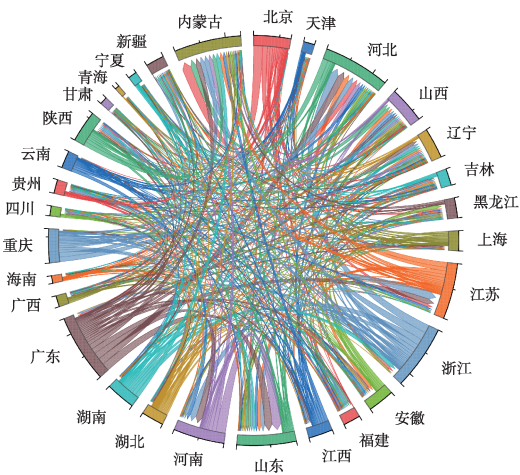


图3 2022、2025和2027年中国各省份资金补偿情况(亿元)

Figure 3 Compensation of funds by province in China in 2022, 2025, and 2027 (100 million yuan)

注:箭头的起始省份为补偿省份,箭头的指向省份为受偿省份。

2024年7月

区。内蒙古和广西分别为受偿额度最高和最低的省份,其受偿额度分别为92.15亿元和2.00亿元,分别约占总体的16%和0.3%。受偿省份可以划分为3类,第1类,以内蒙古、河北和山西为代表的资源型省份,3省总受偿额度约占全国的25%;第2类,以新疆和黑龙江为代表的碳汇量较多省份,其受偿金额分别为28.66亿元和24.96亿元,2省总受偿额度约占全国的10%;第3类,以山东为代表的制造业省份,其受偿金额为17.39亿元。补偿省份为广东、浙江和北京等15个省份,主要分布于华东、华中和华南,其中,广东和河南分别为补偿额度最低和最高的省份,其补偿额度分别为59.71亿元和3.69亿元,分别约占总体的10%和0.6%。补偿省份也可以划分为3类,第1类,以北京、上海、浙江、重庆和天津为代表的经济强省,其中,浙江的补偿金额最高,为44.73亿元;第2类,以湖北、江苏、河南、广东为代表的区内碳排放量较高省份,其中,广东的补偿资金最高,为59.71亿元;第3类,以宁夏为代表的碳汇量较低但净碳转出较少省份,其补偿金额为3.78亿元。2025年和2027年各省份受偿补偿角色基本一致。广东、浙江、北京均为补偿资金最多的3个省份,占总补偿金额的50%左右。新疆仍是受偿金额最多的省份,其在2025年和2027年的受偿额度分别为94.69亿元、89.50亿元。

4.3.2 3种碳预算分配方案下的碳补偿情况

碳预算分配方案根据控制温室气体排放目标将未来的碳排放空间分配到各个省份。现有碳预算分配方案包括公平优先、效率优先和兼顾效率和公平综合原则3种方案。公平优先的碳预算分配方案在各地区历史碳排放量和碳排放转移责任的基础上,以公平为原则为各地区分配碳配额。效率优先的碳预算分配方案将非期望产出二氧化碳作为投入要素,人口数、GDP、资本投入等作为产出要素,通过ZSG-DEA模型得出最高投入产出效率下的碳预算分配结果。兼顾效率和公平综合原则的碳预算分配方案利用熵值法确定权重,分别为公平优先和效率优先的碳预算分配结果赋权,得出兼顾公平和效率的碳预算分配结果。各省份2022、2025和2027年的碳预算情况见表4所示。

3种分配方案下各省份配额补偿具体情况如图

4所示。比较3种方案中市场交易总金额,公平优先的碳预算分配方案下各省份通过市场交易的额度最大,效率优先和综合原则的碳预算分配方案下各省份通过市场交易的额度大体相同。比较3种方案中市场销售和购买额度最大两个省份的总金额,公平优先的碳预算分配方案下总金额较大,效率优先和综合原则的碳预算分配方案的总金额差异不大。为促进区域间协调发展,设计出公平合理的碳补偿机制,兼顾公平和效率综合原则下的碳预算分配方案更符合本文的理念,更适合纳入碳补偿机制中。

4.3.3 配额补偿方式

2022年、2025年和2027年全国通过市场交易的总金额为1177.37亿元、1204.33亿元和1247.55亿元,总体变化不大,呈增长趋势。碳配额赤字的省份一般为碳减排能力较强的省份,碳配额盈余的省份一般为单位碳排放产生经济效益较多的省份。

2022年存在碳配额赤字的省份为河北、内蒙古和山西等14个省份,主要分布在华北、西北和东北地区。河北、内蒙古和山西等资源型省份为支付金额最大的3个省份,其生产侧碳排放量大、减排潜力高,存在较大的碳配额赤字,通过市场交易的金额分别为123.29、109.67亿元和100.64亿元。存在碳配额盈余的省份为青海、江苏和吉林等16个省份,主要分布在华南、华东和华中地区。碳配额盈余较多的省份为四川、山东、上海和广东,分别可以获得资金138.58亿元、82.83亿元、79.40亿元和70.26亿元。存在碳配额盈余的省份大多为碳排放量较少但经济发展水平较高的省份,其单位碳排放量所产生的经济效益较多。在2025年和2027年,山西、河北和内蒙古始终为碳配额赤字最大的3个省份,四川为碳配额盈余最大的省份。各省份交易数额变化不大。

对比资金补偿和配额补偿。资金补偿较为简单,在补偿标准基础上乘以碳价即可,但配额补偿方式将碳预算分配方案纳入,增加碳补偿机制的可操作性。部分省份的角色发生变化,例如,山西、内蒙古和上海。山西和内蒙古在资金补偿方式中为受偿者,在碳预算分配方案中为碳配额赤字省份,需要在市场中购买碳配额。山西和内蒙古的碳排放量大于碳预算,增加“收支-责益”双平衡视角下

表4 2022、2025和2027年3种方案下各省份的碳预算情况 (MtCO₂)Table 4 Provincial carbon allowances under the three scenarios in 2022, 2025, and 2027 (MtCO₂)

省份	2022年			2025年			2027年		
	公平	效率	综合	公平	效率	综合	公平	效率	综合
北京	170.76	166.29	168.68	180.97	178.32	177.62	179.24	192.73	185.51
天津	202.20	194.89	198.80	210.78	210.39	212.42	214.84	215.69	215.24
河北	706.99	844.41	770.86	857.17	807.26	781.17	798.75	851.90	823.45
山西	323.40	465.14	389.28	437.01	392.13	362.16	371.35	411.97	390.23
内蒙古	340.03	684.50	500.14	785.43	563.38	379.78	389.21	850.73	603.72
辽宁	503.71	527.16	514.61	502.05	518.02	540.42	549.12	477.73	515.94
吉林	255.67	182.77	221.79	191.37	232.39	271.76	275.58	187.23	234.52
黑龙江	289.49	218.02	256.27	208.49	258.78	306.39	310.40	207.34	262.49
上海	452.42	226.67	347.49	217.20	348.29	465.08	468.08	211.49	348.82
江苏	982.14	827.66	910.34	838.53	934.23	1028.01	1038.88	832.39	942.90
浙江	568.85	572.30	570.45	600.76	593.43	592.57	598.19	612.82	604.99
安徽	274.57	352.02	310.57	378.10	334.76	303.95	310.91	394.40	349.72
福建	398.64	387.48	393.45	396.36	403.92	414.07	417.73	413.63	415.82
江西	345.93	225.27	289.85	227.38	297.75	362.78	366.77	228.45	302.48
山东	1037.42	1294.00	1156.68	1308.45	1187.57	1096.28	1110.23	1331.68	1213.16
河南	658.45	752.52	702.17	804.49	742.06	696.74	705.82	826.62	761.97
湖北	567.55	401.08	490.18	422.33	511.05	594.31	600.66	440.03	526.00
湖南	483.24	403.31	446.09	423.75	465.28	506.83	512.42	435.36	476.60
广东	1027.68	939.05	986.48	1007.60	1031.56	1059.84	1067.47	1040.17	1054.78
广西	346.79	241.87	298.03	243.28	305.29	362.89	366.71	243.59	309.48
海南	59.15	62.13	60.53	66.05	63.25	61.33	61.85	68.81	65.09
重庆	446.49	182.78	323.92	196.02	334.88	458.20	460.97	204.91	341.95
四川	759.83	491.80	635.25	518.54	657.79	784.44	790.28	539.89	673.90
贵州	244.99	210.45	228.93	234.04	247.77	264.14	268.68	262.04	265.60
云南	262.60	283.08	272.12	330.53	300.13	277.11	280.55	365.39	319.98
陕西	291.46	314.70	302.26	330.42	317.45	310.65	315.20	339.64	326.56
甘肃	170.85	175.32	172.93	181.78	180.85	182.83	185.67	185.34	185.52
青海	47.17	102.31	72.80	116.77	81.09	50.99	51.90	125.23	85.98
宁夏	71.65	191.96	127.57	219.53	145.34	83.70	86.56	238.72	157.28
新疆	194.72	563.89	366.31	603.00	393.78	217.35	222.71	640.79	417.03

碳补偿量的碳预算仍然小于碳排放量,但进行省域间碳补偿,减少了山西和内蒙古需要在市场中购买的碳配额。上海在资金补偿中为补偿者,在配额补偿方式中为碳配额盈余省份,可以在市场中销售碳配额。上海的碳预算远大于碳排放量,减少“收支-责益”双平衡视角后的碳预算仍然大于碳排放量,但进行省域间碳补偿后,上海销售的碳配额减少。

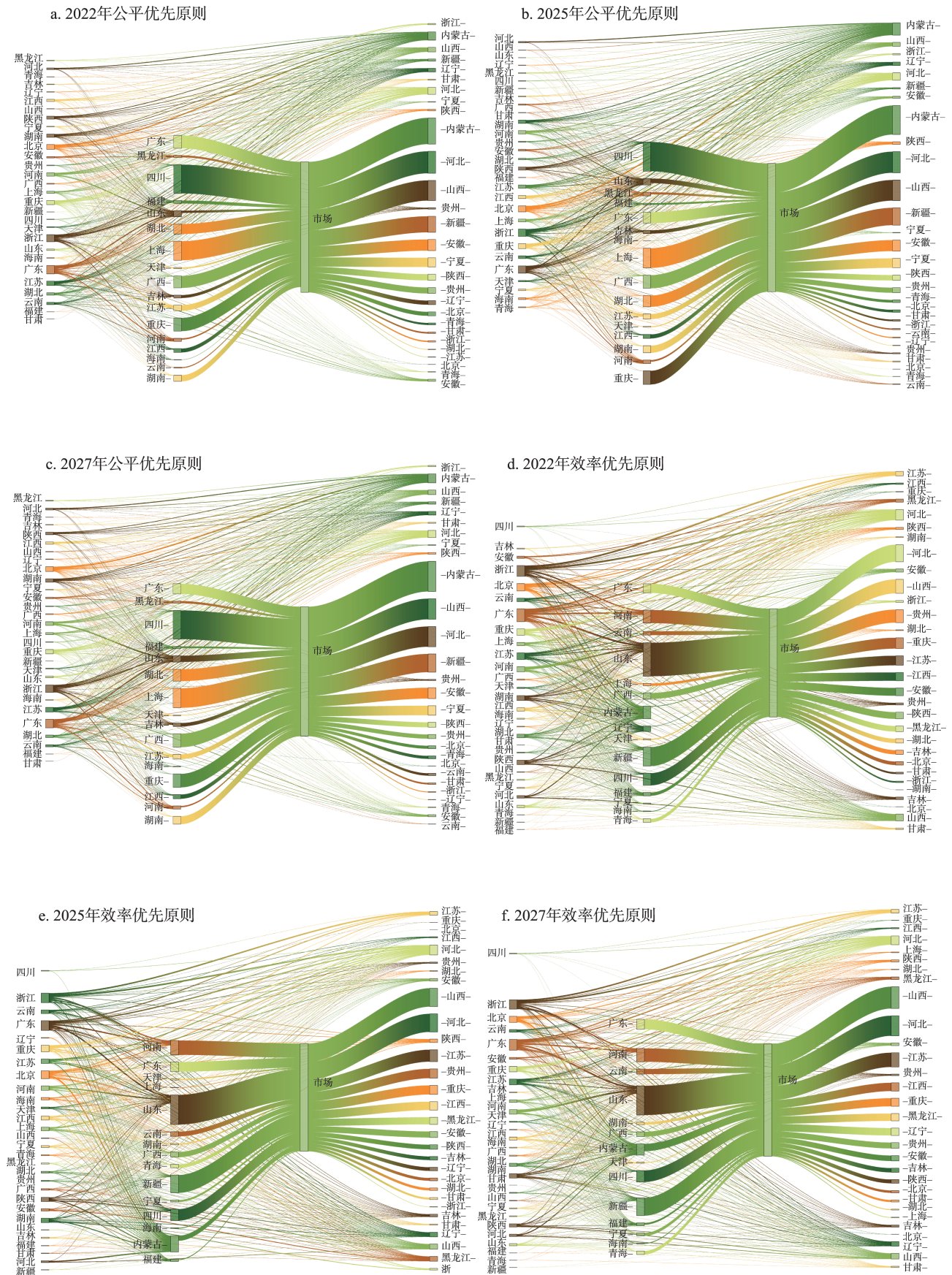
4.4 双碳目标下中国省域碳补偿机制实现路径

在双碳目标背景下,中国省域碳补偿机制的实现路径包括补偿时间范围和补偿方式。

4.4.1 补偿时间范围

“历史补偿”和“未来补偿”相结合。中国于2013年10月首次发布24个行业企业的温室气体排放核算方法与报告指南,并对各行业碳排放核算工作程序进行系统梳理,为核算碳补偿机制奠定了数据基础。考虑到中国多区域投入产出表数据的完备性及中国温室气体核算工作的进程,本文选择2012年为基期,2012—2021年为“历史补偿”阶段。由于只有2012、2015和2017年的投入产出表,中间年度采用离该年度较近之前的投入产出表计算碳

2024年7月



续图4

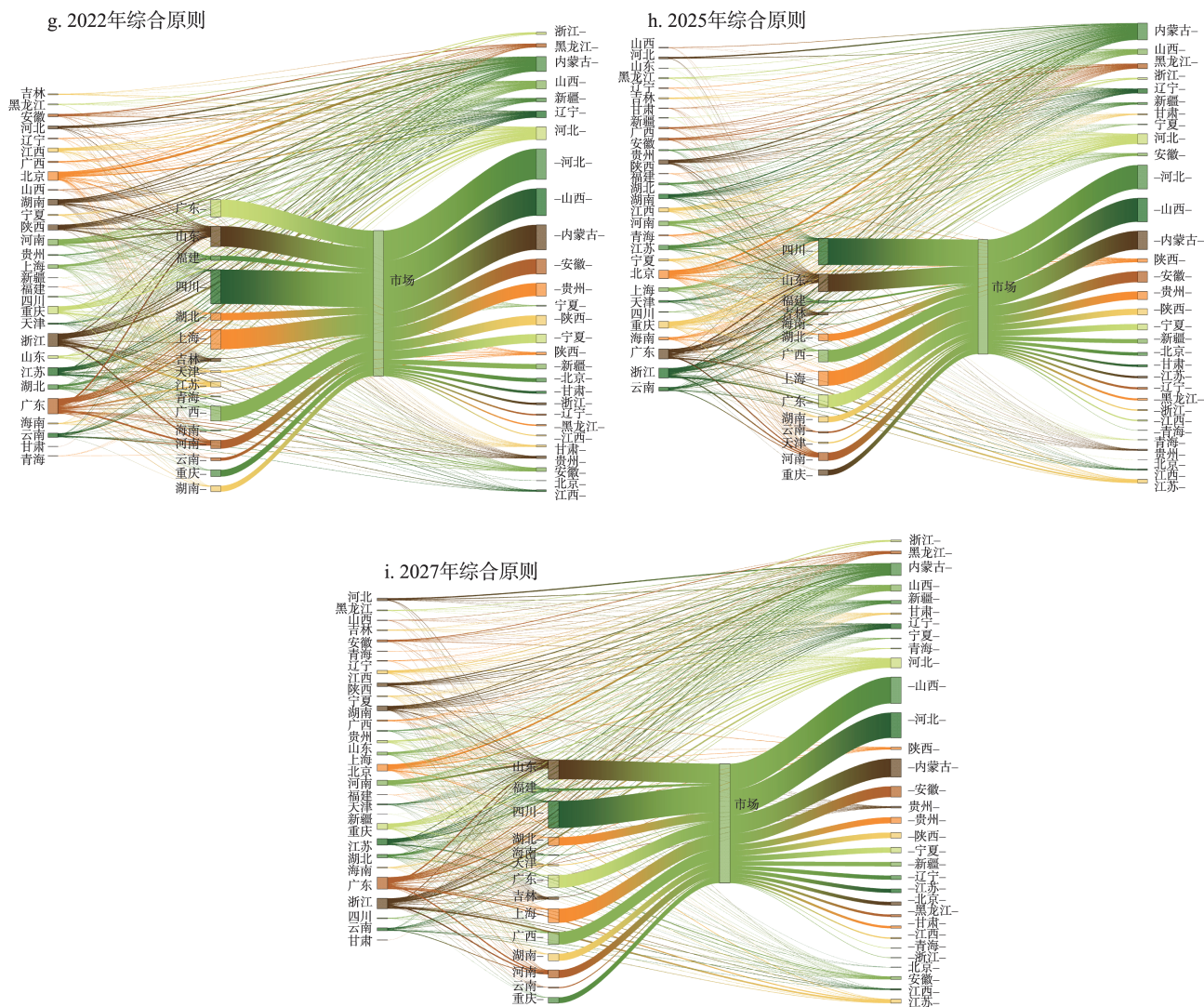


图4 2022年、2025年和2027年中国各省份3个配额分配方案下的补偿情况(亿元)

Figure 4 Compensation of Chinese provinces under the three carbon quota allocation schemes in 2022, 2025, and 2027 (100 million yuan)

注:碳配额补偿阶段中,名称后有“-”标注且位于最右列的省份为受偿者,未有“-”标注的省份为补偿者。市场补偿阶段中,名称后有“-”标注且位于图中间的省份销售碳配额,名称前后均有“-”标注的省份购买碳配额。

补偿量,并采用资金补偿的方式实现各省份间的补偿。以2022—2030年为“未来补偿”阶段,通过已有的中国多区域投入产出表、各省份的碳汇量和碳排放量数据预测未来年度相关数据和投入产出表,中间年度投入产出表的选用方法与“历史补偿”阶段的方法相同,并通过配额补偿的方式实现各省份间的补偿。

4.4.2 补偿方式

通过资金补偿和配额补偿两种方式实现省份

间碳补偿^①,并详细计算中间各个年度的补偿额度。

在资金补偿中,各省份通过转移支付实现补偿。2012—2021年,全国共需支付或者获得的总金额为3116.21亿元。2012—2021年期间均为补偿者的省份有11个,为浙江、北京和重庆等。2012—2021年期间均为受偿者的省份有13个,为广西、吉林和辽宁等。其余6省的角色在2012—2021年期间发生变化。这主要是因为这些省份净碳排放量较小,在不同年度会由净碳转出省份变为净碳转入

① 限于篇幅,文中未列示各省份配额补偿和资金补偿的具体情况,可向作者索要。

2024年7月

省份。同时源汇关系碳补偿和跨区域贸易转移碳补偿的相对大小也会对其角色产生影响。广东、浙江、北京和重庆是支付资金最多的4个省份,分别支付的资金为357.93亿元、266.57亿元、201.34亿元和141.49亿元,约占全国支付总金额的11%、8%、6%和5%。内蒙古、河北、新疆、黑龙江和山西是获得资金最多的5个省份,分别获得467.43亿元、181.25亿元、139.53亿元、138.24亿元和113.04亿元,约占全国获得资金总额的15%、6%、4%、4%和3%。主要由发达地区向欠发达地区进行资金补偿。

在配额补偿中,将碳补偿机制与碳预算相结合,实际碳排放量与补偿后碳预算间的差额通过市场进行交易。2022—2030年,全国共需交易11236.29亿元。2022—2030年期间均为碳配额赤字的省份有13个,为河北、山西和内蒙古等,主要分布在华北、西北和东北地区。2022—2030年期间均为碳配额盈余的省份有11个,为海南、福建和湖南等,主要分布在华南、华东和华中地区。2022—2030年期间在市场中角色发生变化的省份有6个,如浙江和青海等。上述省份的碳排放量与补偿后的碳预算量差距较小,未来年度预测的碳排放量和“收支-责益”双平衡视角下碳补偿量的变动对其角色影响较大。四川、山东、上海和广东是碳配额盈余最多的4个省份,分别获得1250.29亿元、840.05亿元、711.85亿元和578.00亿元,约占全国资金交易总额的11%、7%、6%和5%。山西、河北、内蒙古和安徽是碳配额赤字最多的4个省份,分别支付1208.87亿元、1198.87亿元、905.36亿元和522.52亿元,约占全国资金交易总额的11%、11%、8%和5%。

5 讨论、结论与政策建议

5.1 讨论

考虑到各省份碳源碳汇、贸易碳转移、贸易增加值等因素,为提升双碳目标下碳补偿机制的公平性、系统性和可操作性,本文构建“收支-责益”双平衡视角下的碳补偿机制。与吴立军等^[8]的研究相比,部分净碳转入省份因承担了大量本该由其他省份承担的贸易隐含碳排放量,在本文提出的新视角补偿方案中将获得更多的补偿,如山东、山西、辽宁和河北。与杨军等^[18]和钟诗雨等^[37]的研究相比,部分拥有较多碳汇量的省份,获得越多的补偿量,如

内蒙古、黑龙江和新疆;部分区内碳排放量较多的省份,付出越多的资金,如广东。综上所述,“收支-责益”双平衡视角缓解了部分省份存在的碳泄漏、损益偏离和公共物品外部性等问题,促进各省份在碳减排进程中的公平协调发展。

此外,本文假设中国是一个封闭的区域,不考虑中国各省份与国外间的贸易活动,这一条件下难以准确计算甚至低估对外贸易省份的碳转移量。本文更侧重理论方面的探索,在碳补偿的实际操作中,较少考虑经济发展水平、发展定位、收入状况等因素,忽略了较省份更微观尺度的差异性,可能会使得该研究的精细度和精准度降低。囿于数据可得性和模型复杂度等原因,为减少上述影响,在计算碳补偿额度时为源汇关系碳补偿赋较小的权重。由于难以清晰划分和界定政府转移支付中与碳补偿各因素相关的资金转移量,基于此本文忽略政府转移支付的影响。在未来碳补偿机制设定方面,采用2022年全国碳市场的平均价格作为基准价格(56.07元/t),暂未考虑未来碳市场可能存在因碳配额紧缺,碳价格升高,对未来碳补偿的结果造成一定的偏误的可能性。本文在双碳目标的背景下研究中国省域碳补偿机制,文中虽主要面对碳达峰目标预测投入产出表、计算碳补偿情况和设计碳补偿实现路径,但所构建的实现路径同样适用于碳中和目标的战略制定和远景规划。

5.2 结论

本文以2012—2030年中国30个省份为研究对象,将区域内碳源碳汇关系(反映自然与生产因素差异)与跨区域贸易碳转移(反映经济与消费因素差异)纳入到统一碳补偿框架中,引入“收支-责益”双平衡视角,构建“补偿依据-补偿主体-补偿标准-补偿方式”的跨区域碳补偿理论框架,探索与双碳目标及减碳机制有效融合的省域碳补偿实现路径。得出以下结论:

(1)中国省份间调入调出贸易隐含碳排放量差异较大。省份间最终需求调入调出隐含碳排放量的差异较小,但中间产品调入调出隐含碳排放量的差异较大。河北、山西、内蒙古、山东和河南是中间产品调出较多的省份,其中间产品调出隐含碳接近全国的50%。广东、江苏、上海和北京是中间产品

调入隐含碳最多的省份,其中间产品调入隐含碳接近全国的40%。广东、上海、浙江和北京为重要的净碳转出省份,山西、内蒙古、河北和山东为重要的净碳转入省份。

(2)“收支-责益”双平衡视角将区域内碳源碳汇关系与跨区域贸易碳转移纳入到统一碳补偿框架中,充分考虑各省份间贸易所导致的损益偏离问题以及区域内源汇等因素,丰富现有视角所考虑的因素,缓解碳泄漏和碳汇溢出效应所产生的不公平性,解决碳排放和碳汇公共物品产生的外部性问题,实现资源的有效配置。与“责益”视角相比较,碳汇量较多和区内碳排放量较少的省份获得更多的补偿。与“收支”视角相比较,净碳转入省份或贸易增加值低的省份,即在贸易中处于不利地位的省份,获得更多的补偿。

(3)综合原则的碳预算分配方案较其他方案更适合纳入到公平目标导向的碳补偿机制中。综合原则的碳预算分配方案下各省份支付(或获得)的资金额差距相对较小,通过市场交换的资金总额相对较小。

(4)“历史补偿”阶段(2012—2021年),山西、内蒙古和宁夏等资源型省份,新疆和黑龙江等碳汇量较高的省份、山东等制造业大省获得更多的补偿额。广东等区内碳排放量较大的省份,北京、上海等净碳转出省份付出更多的补偿额。“未来补偿”阶段(2022—2030年),碳配额赤字的省份大部分为碳减排能力较强的省份,碳配额盈余的省份一般为单位碳排放产生经济效益较多的省份。

5.3 政策建议

结合上述研究,本文提出下列政策建议:

(1)积极探索中国特色的省域碳补偿机制。在能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变的背景下,构建省域间公平合理的碳补偿机制是积极稳妥推进碳达峰碳中和的有效制度安排。未来可考虑将本文所提出的基于“收支-责益”双平衡视角构建的碳补偿机制,作为国家碳补偿机制的参考方案之一,积极探索具有中国特色的省域碳补偿机制。同时,尽早在净碳排放转出省份、区内碳排放量较高和碳汇较多的省份开展碳补偿机制的试点工作,为碳补偿机制的落地实施探索有效经验。本研究

所提出的省域碳补偿机制,基于“收支-责益”双平衡视角核算各省份间的碳补偿量,“历史补偿”期间(2012—2021年,即时核算)采取资金补偿方式通过转移支付实现;“未来补偿”期间(2022—2030年)将碳补偿机制与碳预算分配方案相结合,采取配额补偿的方式实现。

(2)完善开展区域碳补偿机制的综合配套体系。公平合理的区域碳补偿机制需要数据、统计核算体系和资金转移支付机制等支撑。中国已基本具备开展省市级碳预算试点工作的基础,未来需建立与碳补偿机制相结合的碳预算制度,将碳补偿量与省域碳配额总量及预算分配相结合。优化现有省域碳配额分配方案,考虑各省份发展状况、资源禀赋和碳源碳汇情况,构建公平目标导向的省域碳配额分配方案。将资金补偿的横向资金转移纳入到政府的转移支付中,健全现有政府转移支付政策制度。通过及时、完备和高精度的数据提高碳补偿额度核算的精确度,进一步完善碳排放统计核算制度,尤其是提升中国多区域投入产出表的编制规范性和标准化,增加多区域投入产出表的更新频率,提升碳排放量和碳汇量等数据的精度。

(3)将宏观调控与微观激励相结合,在碳核算体系引入碳足迹考量,逐步建立政府-市场-社会三元补偿模式的省域间碳补偿制度。以家庭和产品为单位的碳排放核算体系可使补偿与预算更加精确有效。积极推进碳标签等将碳排放量纳入到生活中的活动,促进社会公众进行低碳的生活方式,将社会公众增汇活动所产生的碳配额通过市场进行交易,营造人人进行减排降碳增汇的社会氛围,进而促进中国实现全社会、全维度、各主体的碳减排。

参考文献(References):

- [1] 郑新业, 吴施美, 郭伯威. 碳减排成本代际均等化: 理论与证据[J]. 经济研究, 2023, 58(2): 107-123. [Zheng X Y, Wu S M, Guo B W. Inter-temporal parity of carbon emission reduction costs: Theory and evidence[J]. Economic Research Journal, 2023, 58(2): 107-123.]
- [2] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1425-1437. [Zhao R Q, Zhang S, Huang X J, et al. Spatial variation of carbon budget and

2024年7月

- carbon balance zoning of Central Plains Economic region at county-level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1425–1437.]
- [3] 闫敏, 孙慧. 国内贸易隐含碳转移与损益偏离研究: 基于经济内循环视角[J]. *技术经济与管理研究*, 2021, (12): 12–16. [Yan M, Sun H. A Research on the embodied carbon transfer and profit and loss deviation of domestic trade: Based on the perspective of economic internal circulation[J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2021, (12): 12–16.]
- [4] 刘红光, 张子孟, 郭杰. 中国区域间价值链中隐含的碳排放转移研究[J]. *管理评论*, 2021, 33(9): 58–64. [Liu H G, Zhang Z M, Guo J. Research on embodied carbon emission transfer in China's inter-regional value chain[J]. *Management Review*, 2021, 33(9): 58–64.]
- [5] 赵荣钦, 刘英, 马林, 等. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1675–1687. [Zhao R Q, Liu Y, Ma L, et al. County-level carbon compensation of Henan Province based on carbon budget estimation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1675–1687.]
- [6] Zhu D, Niu Q, Wang Y H, et al. The influence of psychological cognition and policy environment on the basin residents' behavior of ecological compensation under the background of carbon neutrality: A case study in upper Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 1–12.
- [7] 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(5): 116–120. [Zhao R Q, Liu Y, Li Y X, et al. Overview of regional carbon compensation: Mechanism, pattern and policy suggestions[J]. *Areal Research and Development*, 2015, (5): 116–120.]
- [8] 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[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 149–166.]
- [9] 陈儒, 邓悦, 姜志德. 基于修正碳计量的区域农业碳补偿时空格局[J]. *经济地理*, 2018, 38(6): 168–177. [Chen R, Deng Y, Jiang Z D. Spatial and temporal patterns of regional agricultural carbon compensation based on modified carbon measures[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(6): 168–177.]
- [10] Yang G C, Shang P P, He L C, et al. Interregional carbon compensation cost forecast and priority index calculation based on the theoretical carbon deficit: China as a case[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 654(1): 786–800.
- [11] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 679–696. [Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the plan for major function-oriented zones[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 679–696.]
- [12] Zhang H Y, Zhang W, Lu Y L, et al. Worsening carbon inequality embodied in trade within China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(2): 863–873.
- [13] 王正淑, 王继军, 刘佳. 基于碳汇的县南沟流域退耕地补偿标准研究[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 779–788. [Wang Z S, Wang J J, Liu J. Study on the compensation standard of returning farmland to forest in Xiannangou watershed from the perspective of carbon sink[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 779–788.]
- [14] 王立国, 丁晨希, 彭剑峰, 等. 森林公园旅游经营者碳补偿意愿的影响因素比较[J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 230–238. [Wang L G, Ding C X, Peng J F, et al. Comparison of factors affecting tourism operators' carbon offset willingness of forest parks[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 230–238.]
- [15] 孔凡斌, 曹露丹, 徐彩瑶. 县域碳收支核算与碳综合补偿类型分区: 以钱塘江流域为例[J]. *经济地理*, 2023, 43(3): 150–161. [Kong F B, Cao L D, Xu C Y. County-level carbon budget accounting and zoning of comprehensive carbon compensation types: A case study of Qiantang River Basin[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(3): 150–161.]
- [16] Tukker A, Pollitt H, Henkemans M. Consumption-based carbon accounting: Sense and sensibility[J]. *Climate Policy*, 2020, 20(1): 1–13.
- [17] 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.]
- [18] 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.]
- [19] 谢富胜, 程瀚, 李安. 全球气候治理的政治经济学分析[J]. *中国社会科学*, 2014, (11): 63–82. [Xie F S, Cheng H, Li A. An analysis of global climate control from the viewpoint of political economy[J]. *Social Sciences in China*, 2014, (11): 63–82.]
- [20] 黄怀玉, 龚直文. 格网尺度的重庆市碳补偿研究: 基于土地利用视角[J]. *资源科学*, 2023, 45(12): 2358–2371. [Huang H Y, Gong Z W. Grid scale measurement of carbon compensation in Chongqing city: Based on the perspective of land use[J]. *Resources Science*, 2023, 45(12): 2358–2371.]

- [21] 冯祎宇, 刘静, 宋蕊, 等. 如何支付“欠农业的生态账”? 基于农业隐含碳市场化补偿视角[J]. 农业经济问题, 2024, (3): 20–35. [Feng Y Y, Liu J, Song R, et al. How to pay for the “ecological account owed to agriculture”? Based on the horizontal compensation of agricultural implicit carbon in large cities[J]. Issues in Agricultural Economy, 2024, (3): 20–35.]
- [22] 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.]
- [23] 赵永斌, 丛建辉, 杨军, 等. 中国碳市场配额分配方法探索[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 872–883. [Zhao Y B, Cong J H, Yang J, et al. An innovative allowance allocation method in China’s unified national emissions trading scheme[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 872–883.]
- [24] 郑立群. 中国各省区碳减排责任分摊: 基于零和收益DEA模型的研究[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2087–2096. [Zheng L Q. Sharing the carbon emission reduction responsibility across Chinese Provinces: A zero sum gains DEA model[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2087–2096.]
- [25] 王文举, 孔晓旭. 基于2030年碳达峰目标的中国省域碳配额分配研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(7): 113–132. [Wang W J, Kong X X. A study on the allocation of carbon quotas in China’s provinces based on the 2030 carbon peak target[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(7): 113–132.]
- [26] 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.]
- [27] 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. Reevaluation of China’s provincial carbon emissions responsibility based on three-dimensional perspective[J]. Statistical Research, 2018, 35(4): 41–52.]
- [28] 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.]
- [29] Stone R. Multiple classifications in social accounting[J]. Bulletin Institute International Statistical, 1962, (39): 215–231.
- [30] Koopman R, Wang Z, Wei S J. Tracing value-added and double counting in gross exports[J]. Social Science Electronic Publishing, 2014, 104(2): 459–494.
- [31] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997–2015[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 1–14.
- [32] Guan Y, Shan Y, Huang Q, et al. Assessment to China’s recent emission pattern shifts[J]. Earth’s Future, 2021, 9(11): 1–13.
- [33] Yu L S, Qi H, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016–2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 54–54.
- [34] Shan Y, Liu J, Liu Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. Applied Energy, 2016, 184(15): 742–750.
- [35] Jing C, Dan T, Qiang Z, et al. Pathways of China’s PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality[J]. National Science Review, 2021, 12(12): 63–73.
- [36] Zheng H, Zhang Z, Wei W S, et al. Regional determinants of China’s consumption-based emissions in the economic transition[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(7): 1–14.
- [37] 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 等. 基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4637–4646. [Zhong S Y, Zhang X M, Wu J, et al. A provincial carbon compensation mechanism based on carbon abatement costs in China[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4637–4646.]

Provincial carbon compensation mechanism in China based on the “revenue and expenditure–responsibility and benefit” dual balance perspective

YANG Jun^{1,2}, JIA Qian^{1,2}, CONG Jianhui^{1,2}, YANG Ze^{1,3}

(1. School of Economics and Management, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Green Development Research Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. School of Economics, Nankai University, Tianjin 300110, China)

Abstract: [Objective] In order to actively and steadily promote the dual carbon goals and effectively solve the problem of carbon inequity in various provinces, it is important to build a complete, reasonable, and easy-to-implement provincial carbon compensation mechanism. [Methods] Based on the IPCC inventory method, the inter-regional bilateral carbon transfer calculation model, and the row arrange series (RAS) method, this study incorporated the relationship between carbon sources and carbon sinks within the region (reflecting the differences between natural and production factors) and the carbon transfer of cross-regional trade (reflecting the differences between economic and consumption factors) into a unified carbon compensation framework, introduced the “revenue and expenditure-responsibility and benefit” dual balance perspective, constructed a inter-provincial carbon compensation framework of compensation basis, compensation subject, compensation standard, and compensation method, and explored the pathways of provincial carbon compensation that effectively integrate with the dual carbon goals and their carbon reduction mechanisms. [Results] The results show that: (1) Compared with the previous perspectives (“revenue and expenditure” perspective and “responsibility and benefit” perspective), the provinces that bear more embodied carbon emissions from trade, being carbon sinks, and have less carbon emissions within the region, receive more compensation using the “revenue and expenditure-responsibility and benefit” dual balance perspective. (2) Quota compensation schemes based on comprehensive principles are more suitable for inclusion in the fairness-oriented carbon compensation mechanism than those that prioritize fairness or efficiency separately. (3) During the “historical compensation period” (2012–2021), Guangdong, Zhejiang, Beijing, and Chongqing were the four provinces with the largest compensation amounts, and Inner Mongolia, Hebei, Xinjiang, Heilongjiang, and Shanxi were the five provinces with the largest compensated amounts. (4) During the “future compensation period” (2022–2030), Inner Mongolia, Hebei, and Shanxi with greater carbon emission reduction potential will have carbon quota deficits, and Guangdong, Fujian, Tianjin, and Shanghai with high economic benefits per unit of carbon emissions will have carbon quota surpluses. [Conclusion] The carbon compensation mechanism proposed in this paper based on the dual balance perspective of “revenue and expenditure responsibility benefit” is more fair and operable, and can serve as an important reference for the policy design of China’s provincial carbon compensation mechanism. The comprehensive supporting system of the carbon compensation mechanism can be improved and pilot work can be carried out.

Key words: carbon compensation mechanism; multi-regional input-output table; dual carbon goals; IPCC inventory approach; RAS method