

基于 2030 年碳达峰目标的 中国省域碳配额分配研究^①

王文举¹ 孔晓旭²

(1. 北京物资学院双碳研究院、经济学院; 2. 首都经济贸易大学经济学院)

研究目标: 基于 2030 年碳达峰目标, 将公平、效率、责任、发展等多项原则纳入区域间碳排放权分配方案中。**研究方法:** 综合运用空间联立模型、零和博弈 SBM 模型、熵权法等构造不同原则下的碳配额分配方案。**研究发现:** 兼顾公平与效率原则的综合性碳配额分配方案因地区间减排成本差异小而容易被更多主体所接受, 最适合中国当前情况。**研究创新:** 设计的碳配额分配方案在公平性原则的基础上融入可持续发展原则, 在效率性原则的基础上融入零和博弈的思想, 兼具公平性、效率性、可持续性和可操作性。**研究价值:** 制定区域间初始碳配额的合理分配方案, 对于推进省际协同减排战略、建立和完善全国统一碳交易市场、实现 2030 年碳达峰目标具有重要的借鉴意义。

关键词 碳达峰 碳配额 减排成本 空间联立模型 ZSG-SBM 模型

中图分类号 F224.0; F206 **文献标识码** A

DOI:10.13653/j.cnki.jqte.2022.07.002

引言

二氧化碳等温室气体排放是导致全球变暖的主要原因之一。中国作为发展中大国, 勇担碳减排的重任, 在 2015 年《巴黎协定》谈判中承诺“到 2030 年碳排放强度较 2005 年下降 60%~65%”, 习近平总书记在 2020 年的领导人气候峰会上向全世界宣示“二氧化碳排放力争在 2030 年达峰、努力争取 2060 年前实现碳中和”。之后, 党的十九届五中全会和中央经济工作会议对碳达峰和碳中和工作做出安排部署, 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》, 支持各地区梯次有序推进碳达峰。区域间初始碳配额的合理分配是实现碳减排目标的基础(令狐大智等, 2021), 也是推进全国碳排放权交易市场有序建设的重要内容(张宁和张维洁, 2008; 胡鞍钢, 2021)。

国内外学者在碳排放权分配原则和分配方法等方面的研究为本文构建 2030 年碳达峰目标下的省际初始碳配额分配模型提供了重要的参考, 但由于分配原则和分配方法的多样性, 目前尚未形成具有共识性的分配方案(方恺等, 2018), 分配过程中所依据的指标体系和权重计算方法也具有一定主观性(黄煌, 2020), 导致不同方案下的碳配额分配结果差异较大, 单一分配原则下可能出现极端的分配结果(Höhne 等, 2014), 难以被不同排放主体所接

^① 本研究是国家社会科学基金重大项目“中国碳市场成熟度、市场机制完善及环境监管政策研究”(14ZDA072)的阶段性成果。通讯作者为孔晓旭。

受,从而在实践中的应用和推广受到制约。例如基于祖父制原则的分配结果有利于经济发达地区,降低了减排积极性(王倩和高翠云,2016),而基于历史减排责任的原则又会惩罚过于严重,使过去排放量大的地区分得的配额过少,难以满足可持续发展的需求(王文举和陈真玲,2019),因此,构建碳排放权分配方案时应该尽量涵盖不同的分配原则(朱潜挺等,2015)。此外,现有研究大多基于我国2020年碳排放强度相比2005年下降40%~45%计算不同地区的碳配额,以2030年碳达峰目标为核算基准的文献还很有限,亟待构建能够兼具公平性、效率性、可持续性、可操作性的碳配额分配方案。

基于以上分析,本文以实现2030年碳达峰为目标,给出三种省域初始碳配额分配方案:一是在公平性优先的碳配额分配方案中融入可持续发展原则,纳入对各地区历史排放责任和碳转移责任的考量,构建基于责任与发展原则的省际碳配额分配方案,目的是实现碳减排与经济发展之间的有效协同;二是在效率性优先的碳配额分配方案中加入博弈论的思维,各地区就2030年碳排放总量进行零和博弈,一个地区碳配额的增加必须来自其他地区碳配额的减少,ZSG-SBM模型经多次迭代后达到各决策单元效率最大化的分配结果;三是采用熵值法将公平性优先原则的分配结果和效率性优先原则的分配结果进行整合,得出兼顾公平与效率的综合性碳配额分配方案。最后比较不同分配方案的边际减排成本和社会总减排成本,期望能够为实现2030年碳达峰目标、推进全国碳排放权交易市场提供参考和借鉴。

本文的创新性和贡献体现在:第一,以1995年人均GDP最高的上海市为基准,为每个省级区域确定不同的基期,较王文举和陈真玲(2019)将样本分为三组的基期选择方式更能体现公平性;第二,在公平性原则的基础上融入可持续发展原则,将控制碳排放与经济发展的目标进行统筹考虑;第三,在效率性原则的基础上融入零和博弈的思想,采用包含非期望产出的ZSG-SBM模型,多次迭代后达到全国及各省均有效率的结果,体现碳达峰目标的国家统筹和动态调配;第四,采用熵值法计算权重后得到兼顾公平、责任、发展、效率等多种原则的碳配额分配方案,并比较不同分配方案的减排成本,丰富了我国2030年碳达峰目标的省际分解研究。

一、公平性优先的碳配额分配方案:基于责任与发展原则

1. 碳排放历史责任测算

(1) 基期选择体现公平性。准确界定基期是计算各地区碳排放历史责任的基础工作,体现公平性的理想情况是找到不同地区经济发展水平、人口规模、产业结构、碳排放密度等方面均相同的时间作为碳排放历史责任的核算起点。已有文献主要从可操作性的角度出发,基于经济发展水平(人均GDP)相近的原则将样本分为几组,同一组选择相同的基期,不同组选择不同的基期,本文沿袭这一可操作性较强的方案,但也做出一些改进,即为每个省级区域都选择不同的基期,这种方法比分组确定基期的方案更为精准。具体而言,1995年人均GDP最高的是上海市,为21302.45元,找到其他省份与1995年上海市经济发展水平最接近的年份作为该地区碳排放历史责任的计算基期(如表3第2列所示)。

(2) 碳排放历史责任计算结果。各地区的碳排放历史责任为:

$$hCO_{2i} = \sum_{t=t_0}^T CO_{2it} \quad (1)$$

其中,下标*i*代表各省级区域,*t*代表不同年份,*t*₀为不同的基期,*T*为碳排放历史责

任核算的终止年份,在本文中 T 为 2018 年, CO_2 代表各地区在当年的实际碳排放量。

我国各省区区域碳排放历史责任计算结果见表 3 第 3 列。其中,从基期到 2018 年历史碳排放量最多的是山东省,高达 115.7208 亿吨,其次是江苏和河北,历史累计碳排放量分别为 94.7989 亿吨和 93.5338 亿吨,这些地区多为东部省份,依托地理位置优势或政策红利,经济发展起步较早,工业集聚水平高,煤炭资源消耗量大,在高速发展过程中产生了大量的碳排放(Hu 等, 2017),而且过去的减排意识和环境规制强度都比较弱(原毅军和耿殿贺, 2010),未能对高碳排放地区形成有效约束,因此这些地区在未来碳配额的分配中应该承担更多历史责任,分得更少的碳配额。而海南、贵州、云南、甘肃、青海等地区的碳排放历史责任较小,这些地区多为西部经济欠发达省份,工业化起步较晚、进程缓慢,或者因区域面积小或人口少产生的历史碳排放较少,这些地区在基于历史责任原则的未来碳配额分配过程中能够分得更多的碳排放权。

2. 碳排放转移责任测算

本文采用空间计量模型计算出各地区理论上的合理碳排放量,以实际碳排放量与合理碳排放量之差衡量碳排放转移责任。

(1) 样本选择与数据来源。样本涵盖 1995~2018 年中国 30 个省份,西藏因核心指标数据缺失值较多未予纳入。

各省能源消费数据来源于历年《中国能源统计年鉴》中的能源平衡表。其中,1995~2009 年获取能源平衡表中:煤炭、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气和天然气共 11 种能源,2010~2018 年新增高炉煤气、转炉煤气以及液化天然气总共 14 种能源。逐年对每个省消费的各种能源剔除掉能源加工转换过程中的投入量、损失量以及工业生产中用作原料和材料的部分,得到 30 个省区在 1995~2018 年的能源净消费量。再根据各种能源相应的平均低位发热量和二氧化碳排放因子计算得到碳排放量。能源结构、能源强度计算所需数据也来源于《中国能源统计年鉴》。

经济集聚、人均 GDP、城市化水平、劳动就业人口、产业结构、科技支出、交通便利度、对外开放度、商品市场活跃度等指标计算过程中所需的数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》以及《新中国 60 年统计资料汇编》,需要以实际值计算的指标选择 1990 年为基期进行调整。

(2) 计量模型与变量定义。碳排放和经济发展之间存在双向因果关系(王文举和陈真玲, 2019),各地区碳排放量受到经济发展水平影响的同时,也会降低经济集聚水平(张可和汪东芳, 2014),所以采用联立方程模型计算合理碳排放更为科学,并且碳排放存在空间转移特征,会对邻近地区产生影响(孙立成等, 2014; 陈真玲, 2016),采用空间计量模型可以衡量这种溢出效应。因此,本文采用空间联立模型分析各地区碳排放和经济集聚之间的双向因果和空间溢出效应:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln \text{CO}_{2i} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{agg}_{it} + \alpha_2 \ln \text{gdp}_{it} + \alpha_3 \ln \text{labor}_{it} + \alpha_4 \ln \text{es}_{it} + \alpha_5 \ln \text{ee}_{it} \\ \quad + \alpha_6 \ln \text{tech}_{it} + \alpha_7 \ln \text{serve}_{it} + \alpha_8 \ln \text{envpollu}_{it} + \alpha_9 \ln \text{envregu}_{it} \\ \quad + \rho_1 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{CO}_{2jt} + \rho_2 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{agg}_{jt} + \mu_{it} \\ \ln \text{agg}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{CO}_{2it} + \beta_2 \ln \text{triff}_{it} + \beta_3 \ln \text{fdi}_{it} + \beta_4 \ln \text{urban}_{it} + \beta_5 \ln \text{sales}_{it} \\ \quad + \gamma_1 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{CO}_{2jt} + \gamma_2 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{agg}_{jt} + \epsilon_{it} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln \text{CO}_{2i} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{agg}_{it} + \alpha_2 \ln \text{gdp}_{it} + \alpha_3 \ln \text{labor}_{it} + \alpha_4 \ln \text{es}_{it} + \alpha_5 \ln \text{ee}_{it} \\ \quad + \alpha_6 \ln \text{tech}_{it} + \alpha_7 \ln \text{serve}_{it} + \alpha_8 \ln \text{envpollu}_{it} + \alpha_9 \ln \text{envregu}_{it} \\ \quad + \rho_1 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{CO}_{2jt} + \rho_2 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{agg}_{jt} + \mu_{it} \\ \ln \text{agg}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{CO}_{2it} + \beta_2 \ln \text{triff}_{it} + \beta_3 \ln \text{fdi}_{it} + \beta_4 \ln \text{urban}_{it} + \beta_5 \ln \text{sales}_{it} \\ \quad + \gamma_1 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{CO}_{2jt} + \gamma_2 \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij} \ln \text{agg}_{jt} + \epsilon_{it} \end{array} \right. \quad (3)$$

主要变量的含义和构造方法如下:

碳排放：联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）在2006年提出了一种根据化石燃料消耗量和排放因子估算CO₂排放量的方法，因数据获取难度适中、可操作性强、与国际权威温室气体排放数据发布机构（如美国橡树岭国家实验室二氧化碳信息研究中心，CDIAC；美国能源信息署，EIA）的结果相近度高而被相关学者广泛采纳（陈诗一，2011；王峰等，2013；Gao等，2021）。

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n CO_{2,i} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot NCV_i \cdot CEF_i \quad (4)$$

其中，CO₂为二氧化碳排放量，*i*代表煤炭、焦炭、原油、液化石油气等各种能源燃料，*E_i*代表各种能源的燃烧消费量，*NCV_i*代表各种能源的平均低位发热量，用于将各种能源消费量转化为能源单位（TJ），*CEF_i*代表各种能源的二氧化碳排放因子。

经济集聚指经济活动在单位空间内的疏密程度，借鉴范剑勇（2006）、张可和汪东芳（2014），采用单位行政区划土地面积所承载的非农产出衡量。经济发展水平用地区实际GDP来衡量，能源结构用煤炭占能源消费总量的比重计算得到，能源强度用单位非农产出的能源消费量来表示，技术进步用科学技术支出占GDP的比重来衡量，产业结构用第三产业产值占GDP的比重来衡量。

在STIRPAT模型的基础上，本文加入环境规制因素对碳排放的影响，一方面根据各地区工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟尘排放量，采用熵值法计算综合指数衡量地区环境污染程度，是环境规制的逆指标，环境污染综合指数越大代表环境规制程度越低；另一方面采用各地区每年颁布的环境法规数量衡量环境规制强度，法规数越多代表环境规制程度越高。

经济集聚模型中的交通便利度指标用各地区铁路、公路、水路与区域面积的比值来衡量，对外开放度采用外商直接投资实际利用额占GDP的比重来代表，城市化水平通过城市人口与总人口的比重计算得到，市场活跃度用各地区社会消费品零售总额来表示（见表1）。

表1 主要变量定义

变量名称	变量符号	变量定义
碳排放	CO ₂	借鉴IPCC（2006）的方法，根据各地区14种能源消耗量及相应的平均低位发热量和二氧化碳排放因子计算得到 ^①
经济集聚	agg	第二、第三产业的实际产出/行政区域土地面积
经济发展水平	gdp	地区实际国内生产总值（GDP）
人口规模	labor	地区劳动就业人口
能源结构	es	煤炭占能源消费总量的比重
能源强度	ee	单位非农产出的能源消费量
技术进步	techg	科技支出占GDP的比重
产业结构	serve	第三产业产值占GDP的比重
环境污染	envpollu	根据各地区工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟尘排放量，采用熵值法计算综合指数
环境规制	envregu	各地区每年颁布的环境法规数量
交通便利度	triff	各地区铁路、公路、水路与区域面积的比值
对外开放度	fdi	外商直接投资实际利用额占GDP的比重
城市化水平	urban	城市人口与总人口的比重
市场活跃度	sales	地区社会消费品零售总额

① 重庆缺失1995~1996年数据，海南缺失2002年数据，宁夏缺失2000~2002年数据，均通过线性插值法补齐。

(3) 空间权重矩阵的设定。本文设定 4 种空间权重矩阵, 分别是 0—1 相邻矩阵、地理距离矩阵、经济距离矩阵、地理经济综合矩阵。具体如下:

$$W_1 = \begin{cases} 1 & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5)$$

$$W_2 = \begin{cases} 1/d_{ij} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (6)$$

$$W_3 = \begin{cases} 1/|rgdp_i - rgdp_j| & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (7)$$

$$W_4 = \begin{cases} 1/d_{ij}^2 \cdot \text{diag}\left(\frac{rgdp_1}{rgdp}, \frac{rgdp_2}{rgdp}, \dots, \frac{rgdp_n}{rgdp}\right) & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (8)$$

W_1 为 0—1 相邻矩阵, 如果地区 i 与地区 j 的边界相邻则设定为 1, 否则为 0; W_2 为地理距离矩阵, 基于各省会城市所在地的经纬度坐标计算出两个省份之间的欧式距离后取倒数; W_3 为经济距离矩阵, 采用各省之间的人均实际 GDP (1990 年价格) 差异计算; W_4 为地理经济综合矩阵, 其中 $rgdp_i = \frac{1}{t_m - t_0 + 1} \cdot \sum_{t=t_0}^{t_m} rgdp_{it}, i = 1, 2, \dots, n$, 代表样本期内第 i 个地区

实际人均 GDP 的均值, $rgdp = \frac{1}{n(t_m - t_0 + 1)} \cdot \sum_{t=t_0}^{t_m} \sum_{i=1}^n rgdp_{it}, i = 1, 2, \dots, n; t = t_0, t_1, \dots, t_m$, 代表样本期内 30 个省级区域实际人均 GDP 的均值。并且参考 Han et al. (2018)、邵帅等 (2019) 的研究, 在空间计量模型的回归过程中将所有权重矩阵进行标准化处理, 使各行的和为 1。

(4) 空间联立模型估计结果。采用广义三阶段空间最小二乘法 (GS3SLS) 对空间联立模型 (2) 和 (3) 进行参数估计和假设检验, 结果见表 2。在地理距离矩阵 (W_2) 和经济距离矩阵 (W_3) 下, 空间滞后项系数 ρ 能够通过 1% 水平的显著性检验, 在 0—1 相邻矩阵 (W_1) 和地理经济综合矩阵 (W_4) 下, 空间滞后项系数 ρ 能够通过 5% 水平的显著性检验, 表明空间联立模型能够很好地拟合样本数据, 即各个省份的碳排放和经济集聚对其他地区存在显著的空间溢出效应。四个模型在拟合优度 (R^2 及调整 R^2)、AIC 和 SC 等方面的差异均较小, 而采用地理经济综合矩阵 (W_4) 的计量模型不仅能够兼顾地理和经济两个层面的空间溢出效应, 而且通过了空间误差检验 (Moran MI Error)、空间滞后检验 (LM Lag) 和空间自回归检验 (LM SAC), 因此将其作为本文计算各地区合理碳排放量和碳排放转移责任的基准模型。

对于碳排放模型, 经济集聚、实际 GDP、人口规模、能源结构、能源强度、技术进步、产业结构等变量的系数均通过了显著性检验, 并且碳排放的空间滞后项和经济集聚的空间滞后项系数均可通过显著性检验, 表明各地区的碳排放受相邻地区碳排放和经济集聚因素的影响, 与叶琴等 (2018)、邵帅等 (2019) 的研究结果相一致。但环境规制的影响不显著, 可能的原因是经济发展早期我国的环境规制强度较弱, 对低碳发展的重视程度不足, 企业生产

过程中污染减排方面的投入有限（原毅军和耿殿贺，2010），相信随着新《中华人民共和国环境保护法》的施行，环境规制强度显著提升，企业低碳减排意识不断加强，环保方面的投入不断加大，能够对减少碳排放做出重要贡献。

对于经济集聚模型的估计结果表明，交通便利度、对外开放度、城市化水平、市场活跃度等因素对经济集聚有显著的正向影响，而碳排放对经济集聚有显著的负向影响，符合之前学者的研究发现（张可和汪东芳，2014；何文举等，2019）。

表 2 碳排放与经济集聚的空间联立模型估计结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	(0-1 距离)	(地理距离)	(经济距离)	(综合距离)
碳排放模型 (lco2)				
wly_lco2	0.0009** (2.4505)	0.3291*** (3.4478)	0.2173*** (2.9251)	0.2283** (2.5449)
wly_lagg	0.0030*** (3.0127)	0.9692*** (4.5941)	0.6379*** (3.1709)	0.6640*** (3.5809)
lagg	-0.0299*** (-6.2369)	-0.0319*** (-6.5823)	-0.0307*** (-6.2058)	-0.0294*** (-6.0631)
lgdp	1.1301*** (154.3252)	1.1306*** (154.3543)	1.1329*** (152.8260)	1.1298*** (152.3289)
llabor	-0.1061*** (-11.8739)	-0.1083*** (-12.0633)	-0.1076*** (-11.8977)	-0.1056*** (-11.7011)
les	0.1792*** (10.4722)	0.1795*** (10.4909)	0.1814*** (10.5949)	0.1808*** (10.5581)
lee	0.9941*** (105.9627)	0.9944*** (106.0056)	0.9949*** (105.7947)	0.9958*** (106.2529)
ltechg	0.0608*** (2.7241)	0.0524** (2.3485)	0.0644*** (2.9049)	0.0567** (2.5390)
ltechg2	-0.0067* (-1.7540)	-0.0052 (-1.3467)	-0.0071* (-1.8444)	-0.0060 (-1.5646)
lserve	-0.1314*** (-4.9331)	-0.1480*** (-5.4014)	-0.1304*** (-4.8958)	-0.1343*** (-4.9434)
lenvpollu	0.0085 (0.7738)	0.0086 (0.7770)	0.0094 (0.8552)	0.0086 (0.7733)
lenvregu	-0.0026 (-0.7016)	-0.0024 (-0.6460)	-0.0027 (-0.7500)	-0.0026 (-0.7197)
_cons	0.3630*** (5.5529)	0.3656*** (5.4583)	0.3395*** (5.2225)	0.3715*** (5.4491)
ρ	0.0009**	0.3291***	0.2173***	0.2283**
[p]	[0.0145]	[0.0006]	[0.0036]	[0.0111]
R^2	0.9922	0.9922	0.9922	0.9922
Adj- R^2	0.9920	0.9921	0.9921	0.9921
AIC	-1551.874	-1558.793	-1554.570	-1559.168
SC	-1492.344	-1499.263	-1495.040	-1499.638
Root MSE	0.0816	0.0812	0.0815	0.0812

(续)				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	(0—1 距离)	(地理距离)	(经济距离)	(综合距离)
经济集聚模型 (lagg)				
<i>wly_lagg</i>	0.0018 (0.2640)	6.7619*** (4.9965)	2.6209* (1.9585)	6.0734*** (5.1369)
<i>wly_lco2</i>	-0.0011 (-0.4228)	2.6057*** (4.2765)	0.7515 (1.5135)	2.9928*** (5.2742)
<i>lco2</i>	-0.1693*** (-3.5378)	-0.1662*** (-3.4603)	-0.1670*** (-3.4842)	-0.1814*** (-3.7877)
<i>ltriff</i>	0.9012*** (32.8952)	0.8661*** (32.1944)	0.8901*** (33.1772)	0.8766*** (32.7717)
<i>lfdi</i>	0.3135*** (14.6724)	0.3316*** (15.5895)	0.3171*** (15.2405)	0.3143*** (14.5563)
<i>lurban</i>	0.8744*** (13.5660)	0.8648*** (13.5546)	0.8745*** (13.6016)	0.8874*** (13.8410)
<i>lsales</i>	0.4100*** (11.2031)	0.3905*** (10.5070)	0.4055*** (11.0547)	0.4169*** (11.1036)
<i>_cons</i>	-2.8454*** (-10.2090)	-2.7537*** (-9.5058)	-2.8593*** (-10.5086)	-3.0089*** (-10.3556)
R^2	0.8405	0.8433	0.8410	0.8442
$Adj-R^2$	0.8389	0.8418	0.8394	0.8427
AIC	1182.217	1169.477	1180.113	1165.165
SC	1218.851	1206.111	1216.747	1201.799
$Root\ MSE$	0.5469	0.5421	0.5461	0.5405
联立模型				
N (个)	720	720	720	720
R^2 (McElroy)	0.9857	0.9858	0.9858	0.9858
$Adj-R^2$ (McElroy)	0.9855	0.9856	0.9856	0.9856
F [p]	5.2e+03*** [0.0000]	5.2e+03*** [0.0000]	5.2e+03*** [0.0000]	5.2e+03*** [0.0000]
$Chi2$ [p]	3.1e+03*** [0.0000]	3.1e+03*** [0.0000]	3.1e+03*** [0.0000]	3.1e+03*** [0.0000]
(1974) AIC	0.0068	0.0067	0.0068	0.0067
(1973) $Log\ AIC$	-4.9933	-5.0029	-4.9970	-5.0034
(1978) SC	0.0074	0.0073	0.0073	0.0073
(1978) $Log\ SC$	-4.9106	-4.9202	-4.9143	-4.9207
$Moran\ MI\ Error\ Test$ [p]	-0.0321 [0.9744]	-19.1124*** [0.0000]	-3.6694*** [0.0002]	-5.1483*** [0.0000]
$LM\ Error$ (Robust) [p]	0.2980 [0.5851]	8.0630*** [0.0045]	0.6342 [0.4258]	4.2841** [0.0385]
$LM\ Lag$ (Robust) [p]	1.2464 [0.2642]	15.2753*** [0.0001]	1.0287 [0.3105]	7.3774*** [0.0066]
$LM\ SAC$ ($LM\ Err+LM\ Lag_R$) [p]	1.8205 [0.4024]	15.6264*** [0.0004]	1.0340 [0.5963]	7.4069** [0.0246]

注：小括号内为 t 值，中括号内为 p 值，***、**、* 分别代表系数在 1%、5% 和 10% 的显著性水平下通过 t 检验。 wly_lco2 代表碳排放的空间滞后项， wly_lagg 代表经济集聚的空间滞后项。

(5) 碳排放转移责任计算结果。仅核算当期责任不能反映出发达地区的碳排放历史责任(王文举和李峰, 2015), 需要核算各地区的碳排放历史责任并从未来碳配额的分配中予以扣除。计量模型(2)代表经济、人口、能源、技术、环境规制等因素对碳排放量的影响, 对空间联立模型进行参数估计并代入原模型即可估算出各地区的合理碳排放量, 本文采用真实碳排放量与合理碳排放量之间的残差代表碳转移责任。若残差为正, 代表该省份是碳排放转出地区, 即将自身发展过程中产生的二氧化碳向其他地区进行了转移, 反之则为碳排放转入地区, 承接了其他地区的碳转移。

各省基期至2018年累积碳排放转移责任的计算结果见表3第4列和图1。其中, 河北、安徽、天津、四川、上海等地区的碳排放转出较多, 而内蒙古、广东、黑龙江、新疆、山东、浙江等地区的碳排放转入较多, 通常认为能源富集区域向能源匮乏区域、经济发展水平高的地区向经济欠发达地区转移了大量的碳排放(石敏俊等, 2012)。

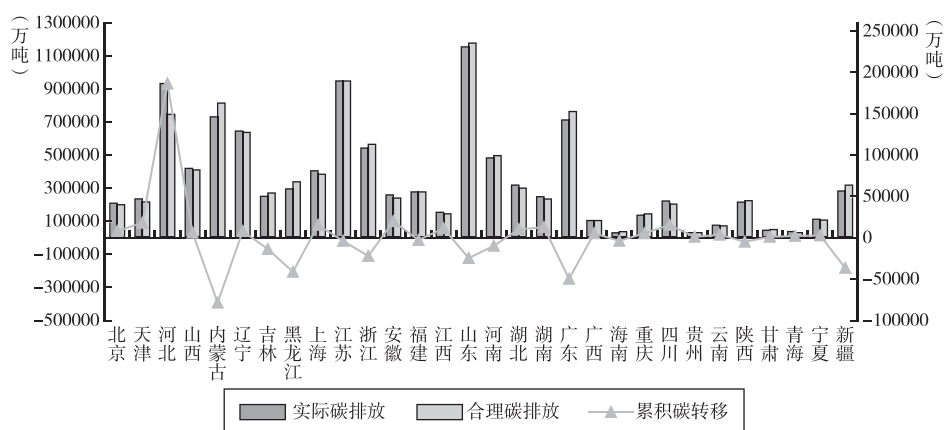


图1 各省基期至2018年的累积碳排放转移情况

3. 2030年碳排放总量与各地区碳排放量

我国2030年碳达峰目标是单位国内生产总值 CO_2 排放较2005年下降60%~65%。国内外学者基于不同准则的估算结果存在一些差别, 通常基于温升目标计算的碳排放量小于碳强度下降目标计算的碳排放量。例如Meinshausen等(2015)基于 2°C 温升目标估算的2030年碳排放量为83.44亿吨, 张浩然和李玮(2020)基于 1.5°C 温升目标估算的结果为37.40亿~108.72亿吨(均值为73.06亿吨), 基于碳强度比2005年下降60%~65%估算的中国2030年碳排放总量目标为122.35亿~139.84亿吨(均值为131.10亿吨), Xu等(2017)基于碳强度减排目标估算的结果为103.9亿吨。本文借鉴黄煌(2020)、周迪等(2020)、田云和林子娟(2021)的相关参数设定, 以2005年为基准年, 2030年为目标年, 选择碳强度下降65%的最高目标, 以及国内生产总值增速为6%的下限, 估算出我国2030年碳排放总量为131.9931亿吨。

关于我国2030年各省级区域的碳排放量, 结合各地区碳排放量占全国碳排放总量的比例进行估算。1995~2012年我国碳排放总量呈上升趋势, 但随着气候变化压力加大以及碳减排目标受到高度重视并纳入国民经济发展规划, 碳排放量从2013年开始出现结构性变化并逐渐回稳(王文举和陈真玲, 2019), 因此以2013~2018年各地区碳排放量占全国碳排放总量的比例来计算各地区2030年的碳排放量, 结果见表3第8列。

4. 公平性优先的碳配额分配结果

基于人际平等原则、历史责任原则与经济发展原则的方案能够全面反映公平的核心观点(王文举和李峰, 2015)。若个别地区的碳减排历史责任与转移责任超出可承受能力从而影响经济可持续发展, 这也是发展机会不公平的一种体现, 因此碳配额的分配有必要在历史责任与转移责任的基础上综合考虑不同地区的经济发展情况。

本文根据碳排放历史责任和转移责任设计一个奖惩机制, 将某地区的碳排放总责任与经济发展水平相适应的碳排放量相偏离的部分予以补偿或削减, 得到公平性优先、考虑地区可持续发展的碳配额。具体而言, 设 $i=1, 2, \dots, n$, 分别代表北京、天津、河北等 30 个省级区域, S 为 2030 年碳排放总量目标, S_i 为各省级区域的碳配额, r_i 为责任份额(各省年均责任占全国年均总责任的比重), X_i 为各地区与经济发展水平(采用实际 GDP 衡量)相适应的碳排放量($X_i = GDP_i / GDP \cdot \text{碳排放总量}$), Y_i 为各地区基期至 2018 年的碳排放年均责任, 则各省 2030 年的碳配额应该按如下方式分配:

$$S_i = S \cdot r_i + (X_i - Y_i) \quad (9)$$

基于公平性优先原则的 2030 年我国各省级区域的碳配额分配结果见表 3 第 7 列。与前文按历史比例估算的 2030 年各地区碳排放量相比, 只有天津的碳配额与碳排放量差额较小, 有 0.13 万吨的盈余, 浙江、福建、湖北、广东、四川等地出现碳配额富余, 河北、山西、内蒙古、辽宁、新疆等地出现碳配额不足。这种基于惩罚机制的分配方案能够体现出碳排放历史责任和转移责任, 并且兼顾了经济可持续发展的条件, 各地区虽然有配额盈余或不足, 但随着我国碳配额交易市场的逐渐完善, 可以通过市场机制予以调整。

表 3 各地区碳排放历史责任、转移责任与 2030 年碳配额 (单位: 万吨)

地 区	历史责任 计算基期	碳排放 历史责任	碳排放 转移责任	碳排放 总责任	碳排放 年均责任	公平优先的 碳配额	2030 年 碳排放
北京	1996 年	208615.67	8152.07	216767.74	9424.68	17558.57	11395.72
天津	2001 年	234844.04	17906.16	252750.20	14041.68	20836.36	20836.23
河北	2008 年	935337.65	185748.01	1121085.66	101916.88	81085.60	119767.44
山西	2011 年	421930.39	4039.43	425969.82	53246.23	38100.41	66995.22
内蒙古	2007 年	734586.35	-79110.13	655476.22	54623.02	41107.83	84504.72
辽宁	2006 年	647714.31	7934.07	655648.38	50434.49	56263.22	69880.09
吉林	2008 年	255808.57	-12546.03	243262.54	22114.78	27174.74	29497.67
黑龙江	2008 年	296722.90	-41351.21	255371.69	23215.61	32054.64	36177.12
上海	1995 年	401701.46	15682.11	417383.57	17390.98	29870.03	26133.62
江苏	2004 年	947989.34	-2741.92	945247.42	63016.49	105822.70	98906.70
浙江	2003 年	543480.44	-22037.13	521443.31	32590.21	62462.65	48484.18
安徽	2012 年	262926.62	19658.02	282584.64	40369.23	53801.16	47864.20
福建	2006 年	278009.57	-2372.07	275637.50	21202.88	41955.88	29528.18
江西	2012 年	150895.46	11094.37	161989.83	23141.40	31509.64	28009.31
山东	2005 年	1157207.53	-24970.54	1132236.99	80874.07	116717.56	112977.15
河南	2010 年	483076.10	-9596.52	473479.58	52608.84	70162.45	65319.76

(续)

地 区	历史责任 计算基期	碳排放 历史责任	碳排放 转移责任	碳排放 总责任	碳排放 年均责任	公平优先的 碳配额	2030 年 碳排放
湖北	2010 年	319262.20	11605.09	330867.29	36763.03	57348.04	41753.59
湖南	2011 年	246696.51	12535.48	259231.99	32404.00	49377.76	38544.19
广东	2004 年	713159.17	-50210.33	662948.84	44196.59	112150.01	67538.56
广西	2013 年	127981.39	4737.29	132718.68	22119.78	37177.45	26554.88
海南	2011 年	28767.65	-4734.71	24032.94	3004.12	7090.47	4597.42
重庆	2010 年	141171.81	3604.25	144776.06	16086.23	25105.20	19382.50
四川	2012 年	220720.36	16023.29	236743.65	33820.52	62595.71	38879.93
贵州	2018 年	26539.85	-221.92	26317.93	26317.93	25464.72	32250.08
云南	2015 年	75305.89	4422.97	79728.86	19932.22	30693.05	24099.95
陕西	2011 年	216115.30	-5154.14	210961.16	26370.15	32288.25	33844.58
甘肃	2016 年	48112.79	1264.37	49377.16	16459.05	18811.18	20323.33
青海	2012 年	34291.89	2424.53	36716.42	5245.20	5065.80	6215.04
宁夏	2012 年	113248.11	2647.55	115895.66	16556.52	8519.96	20494.78
新疆	2011 年	285514.33	-36823.67	248690.66	31086.33	21760.43	49175.34

二、效率性优先的碳配额分配方案：基于竞争与协同原则

在 2030 年碳达峰目标的总量约束下,碳配额作为一种权利,在不同地区之间具有竞争性,因此对碳排放权的分配方案应该纳入区域间协同发展的总体战略性思维,充分考虑到不同排放主体的投入产出效率。零和博弈 DEA 模型(ZSG-DEA)被用于解决资源分配问题,该方法假设整个经济系统中的资源是固定的,因此一个决策单元的投入资源增加将导致其他决策单元的投入资源减少(Lins 等,2003)。很多文献在采用 ZSG-DEA 方法处理基于效率原则的碳排放权分配问题时,将非期望产出 CO_2 作为投入要素,GDP、人口、资本投入等作为产出要素,原理是在碳排放权相同的情况下,若决策单元能拥有更多的 GDP、人口、能源等要素,代表较高的分配效率(Gomes 和 Lins,2008;林坦和宁俊飞,2011;王勇等,2017),但这种处理方式存在两个问题:一方面,现实中经济主体的投入是人口、能源、资本等,期望产出是 GDP,而 CO_2 是作为非期望产出存在的;另一方面,已有文献大多基于投入导向的模型(郭际等,2015;郭文等,2020),而碳配额分配问题应该是在投入要素保持不变的基础上对非期望产出进行调整,即产出导向的模型更符合现实情况。因此,本文采用产出导向、规模报酬不变的 ZSG-SBM 模型制定碳配额在我国各省级区域间的分配方案。

1. ZSG-SBM 模型

SBM 模型(Slack Based Measure)根据决策单元的投入和产出松弛进行效率改进(Tone,2001、2010),可以用于测算碳排放效率(Choi 等,2012;Yan 等,2018)。本文采用 $i=1,2,\dots,30$ 代表我国的 30 个省级区域(决策单元), $m=1,2,\dots,M$ 分别代表 m 个期望产出, $n=1,2,\dots,N$ 分别代表 n 个投入要素, $r=1,2,\dots,R$ 分别代表 r 个非期望产出, λ 代表正的强度向量。区域 i 的投入要素、期望产出和非期望产出分别用 x_{ni} 、 y_{mi} 和 CO_{2ni} 表示,产出导向包含非期望产出(CO_2)的 SBM 模型表达式见模型(10):

$$\rho_0^* = \min \left(1 + \frac{1}{M+R} \left(\sum_{m=1}^M \frac{S_{mi}^y}{y_{mi}} + \sum_{r=1}^R \frac{S_{ri}^c}{CO_{2ri}} \right) \right) \quad (10)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^J \lambda_j x_{nj} + S_{ni}^x = x_{ni} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{mj} - S_{mi}^y = y_{mi} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j CO_{2rj} + S_{ri}^c = CO_{2ri} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1 \\ S_{ni}^x, S_{mi}^y, S_{ri}^c, \lambda_j \geq 0 \end{cases}$$

其中 ρ_0^* 为投入和产出的平均效率, S_n^x 、 S_m^y 、 S_r^c 分别代表投入要素、期望产出、非期望产出的松弛变量。

借鉴 Lins 等 (2003) 和 Gomes 和 Lins (2008) 将零和博弈思想融入效率评价方法中, 在 2030 年碳排放权总量恒定的情况下, 碳配额在各省之间的分配具有竞争性, 通过对无效决策单元的非期望产出松弛变量进行调整实现效率提升, 最终整体和各决策单元均有效率的分配方案就体现了地区间的协同发展。参考郭文等 (2017), 令 $h_i = (CO_{2ri} - S_{ri}^c) / CO_{2ri}$, $i = 1, 2, \dots, 30$, ZSG-SBM 模型的表达式为:

$$\rho_0^* = \min h_i^{ZSG} \quad (11)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^J \lambda_j x_{nj} + S_{ni}^x = x_{ni} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{mj} - S_{mi}^y = y_{mi} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j CO'_{2rj} = h_i^{ZSG} \cdot CO_{2ri} \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1 \\ S_{ni}^x, S_{mi}^y, S_{ri}^c, \lambda_j \geq 0 \end{cases}$$

参考刘海英和王钰 (2020) 的设定, 地区 i 为实现效率提升需要减少 $u_i(1 - \varphi_u^i)$ 单位碳排放, 按照比例分配策略, 其他地区 m ($m \neq i$) 的碳排放权需要相应增加 $u_i(1 - \varphi_u^i) \cdot \frac{u_m}{\sum_{n=1, n \neq i}^N u_n}$, 全部地区都调整后 m 地区共需要增加碳排放权 $\sum_{n=1, n \neq i}^N \left(u_i(1 - \varphi_u^i) \cdot \frac{u_m}{\sum_{n=1, n \neq i}^N u_n} \right)$, 共需要减少碳排放权 $u_m(1 - \varphi_u^m)$, 因此调整后 m 地区的碳配额为:

$$u'_m = u_m + \sum_{n=1, n \neq i}^N \left(u_i(1 - \varphi_u^i) \cdot \frac{u_m}{\sum_{n=1, n \neq i}^N u_n} \right) - u_m(1 - \varphi_u^m) = u_m \varphi_u^m + \sum_{n=1, n \neq i}^N \left(\frac{u_i(1 - \varphi_u^i) \cdot u_m}{\sum_{n=1, n \neq i}^N u_n} \right) \quad (12)$$

经过多次迭代调整后, 达到整体及各决策单元最有效率的结果, 此时各地区的碳配额是零和博弈下的效率原则分配结果。

2. 2030年各指标数值的估算

根据前文的设定,我国2030年碳排放总量为131.9931亿吨,各地区的碳排放量采用2013~2018年占全国碳排放总量的比例计算得到。2016年12月29日,国家发改委和国家能源局2016年印发《能源生产和消费革命战略(2016~2030)》,提出到2030年全国能源消费总量控制在60亿吨标准煤以内,本文以此作为2030年全国能源消费总量的数值,各地区2030年的能源消费量按照其2013~2018年占全国的比例进行估算。

2030年全国人口、实际GDP、固定资本存量的数据采用2013~2018年的平均增长率计算得到。与各地区碳排放量和能源消费量的估算方法保持一致,以2013~2018年各地区人口、固定资本存量、能源消费量、实际GDP占全国总量的比例来计算各地区2030年的指标数值。其中,人口、能源消费量、实际GDP的计算方法与表1相同,固定资本存量的计算参考单豪杰(2008)的方法,折旧率为10.96%,采用永续盘存法。计算过程中用到的固定资本形成总额及指数来自《中国国内生产总值核算历史资料(1952~1995)》《中国国内生产总值核算历史资料(1952~2004)》《新中国60年统计资料汇编》《中国统计年鉴》等,2018年各省份固定资本形成总额指标在《中国统计年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》、各省份统计年鉴等渠道均无法获取,本文通过《中国统计年鉴(2019)》中“分地区按领域分固定资产投资(不含农户)比上年增长情况”计算得到2018年的投资数据,进而计算2018年的固定资本存量。

3. 效率性优先原则的碳配额分配结果

效率性优先原则的碳配额分配结果见表4。根据初始SBM效率结果,北京、上海、浙江、安徽、广东等东部和沿海地区的效率值为1.0000,这些地区在经济发展、低碳技术、能源利用效率、环境规制强度等方面都处于比较高的水平,而陕西、甘肃、青海、贵州等西部地区的效率未达有效前沿,根据松弛变量的指示对这些地区的碳配额进行增减能够进一步提升效率值。与郭文等(2017)对我国2020年各省份碳配额的效率估算结果相比可以发现,更多省份的初始效率值达到了生产可能性前沿,各省份2030年的初始效率值也更高,说明我国的碳排放与劳动、资本、能源等要素的投入和经济产出之间的协调性在稳步提升。

经过5次迭代调整后,北京、天津、上海、江苏、浙江、安徽、福建、山东、广东的效率值达到1.0000,表明在全国碳排放总量恒定的情况下通过省际的碳配额调整让更多地区达到了技术效率前沿,并且其他地区的效率也有所提升,各省份平均效率由0.7420上升至0.8441。从第6次迭代开始无法继续提升各省份的效率值,表明在国家统筹原则下通过地区间的碳配额调整能够有效提升效率,但不是所有省份都能达到效率值为1.0000,与文献中各地区最终效率均为1.0000的结果有所不同,主要原因是:林坦和宁俊飞(2011)、王勇等(2017)基于投入导向模型,将碳排放权作为唯一投入要素进行配额的调整,刘海英和王钰(2020)、郭文等(2020)同时调整期望产出(GDP)和非期望产出(碳排放),而本文基于产出导向的模型更符合现实,并且考虑到GDP不能由政府部门直接调配,因此在碳配额方案的调整过程中保持期望产出不变,仅通过碳配额在省际的零和调整来提高效率。

表4第8列是各省份在效率值最高情况下的碳配额,与本文估算的2030年各地区碳排放相比,各地区的碳配额增减幅度不大,只需在小范围进行调整即可实现有效率的分配结果。因此,基于效率原则的碳配额分配方案体现了2030年碳达峰总量目标约束下各省份之间关于碳配额的竞争与协同,通过多次迭代调整实现效率的提升,这个过程和结果的实现需要中央和各级地方政府决策部门的统筹与协调。

表 4

基于 ZSG-SBM 方法的碳配额分配结果

(单位: 万吨)

地区	初始		第 1 次迭代	第 2 次迭代	第 3 次迭代	第 4 次迭代	第 5 次迭代	
	碳配额	效率值	效率值	效率值	效率值	效率值	碳配额	效率值
北京	11395.72	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	19912.27	1.0000
天津	20836.23	0.9028	0.9648	0.9943	1.0000	1.0000	28569.40	1.0000
河北	119767.44	0.6268	0.7049	0.7834	0.8005	0.8005	64726.56	0.8005
山西	66995.22	0.6013	0.6608	0.7525	0.7856	0.7858	25619.67	0.7858
内蒙古	84504.72	0.6131	0.6828	0.7561	0.7743	0.7743	47448.58	0.7743
辽宁	69880.09	0.7207	0.8106	0.9341	0.9702	0.9702	40419.07	0.9702
吉林	29497.67	0.6592	0.6851	0.6962	0.6981	0.6981	42821.06	0.6981
黑龙江	36177.12	0.7209	0.8092	0.8908	0.9120	0.9121	26442.45	0.9121
上海	26133.62	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	45664.48	1.0000
江苏	98906.70	0.8516	0.9460	0.9942	0.9999	1.0000	112475.61	1.0000
浙江	48484.18	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	84718.65	1.0000
安徽	47864.20	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	83635.32	1.0000
福建	29528.18	0.8736	0.9511	0.9921	0.9998	1.0000	36655.39	1.0000
江西	28009.31	0.7075	0.7825	0.8372	0.8498	0.8499	25766.28	0.8499
山东	112977.15	0.7934	0.8402	0.9791	1.0000	1.0000	97153.87	1.0000
河南	65319.76	0.6387	0.6758	0.6927	0.6952	0.6952	85124.51	0.6952
湖北	41753.59	0.7636	0.8215	0.8507	0.8559	0.8559	52353.06	0.8559
湖南	38544.19	0.7534	0.8305	0.8791	0.8890	0.8890	40094.42	0.8890
广东	67538.56	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	118013.23	1.0000
广西	26554.88	0.7268	0.7758	0.8004	0.8051	0.8051	33976.29	0.8051
海南	4597.42	0.7929	0.8204	0.8320	0.8343	0.8343	7028.25	0.8343
重庆	19382.50	0.7640	0.8313	0.8703	0.8786	0.8787	22293.95	0.8787
四川	38879.93	0.8246	0.9081	0.9568	0.9662	0.9662	43790.70	0.9662
贵州	32250.08	0.6014	0.6619	0.7378	0.7629	0.7633	16610.37	0.7633
云南	24099.95	0.6507	0.6896	0.7090	0.7127	0.7127	30859.34	0.7127
陕西	33844.58	0.6432	0.7029	0.7433	0.7521	0.7521	32500.24	0.7521
甘肃	20323.33	0.6158	0.6766	0.7289	0.7427	0.7429	15785.68	0.7429
青海	6215.04	0.5287	0.5553	0.5690	0.5720	0.5720	7752.25	0.5720
宁夏	20494.78	0.3826	0.4053	0.4342	0.4442	0.4444	10556.80	0.4444
新疆	49175.34	0.5025	0.5417	0.5996	0.6200	0.6202	21163.69	0.6202
平均		0.7420	0.7912	0.8338	0.8440	0.8441		0.8441

三、兼顾公平与效率的综合性碳配额分配方案

公平原则考虑了各地区的碳排放历史责任和转移责任,而效率原则考虑了各地区的碳减排能力,更优的碳配额分配方案应该是在公平与效率之间的权衡(Duan 等,2018;王文举和陈真玲,2019)。为综合不同分配原则和分配方法的优势,本文采用熵值法将公平性优先

原则下的碳配额分配结果和效率性优先原则下的碳配额分配结果进行整合,得出兼顾公平与效率的综合性碳配额分配方案。

1. 熵值法确定权重

熵值法是一种客观赋权方法,能够避免专家打分法、层次分析法等主观赋权法的人为因素偏差。其基本原理是根据指标信息熵和变异性的进行权重分配,即信息熵越小,代表离散程度越大,指标的信息含量越大,对应的权重也越大,反之则权重越小。经计算,本文中基于公平原则的碳配额指标与基于效率原则的碳配额指标的权重 W_1 和 W_2 分别为 0.5352 和 0.4648,即兼顾公平与效率的综合性碳配额分配方式是:

$$mCO_{2i} = W_1 CO_{2公平} + W_2 CO_{2效率} = 0.5352 CO_{2公平} + 0.4648 CO_{2效率} \quad (13)$$

2. 基于综合原则的碳配额分配结果

将各省份公平性优先的碳配额分配结果与效率性优先的碳配额分配结果分别乘以熵值法计算出的权重后,加总得到兼顾公平与效率的综合性碳配额分配结果(见表5)。可以发现,河北、山西、内蒙古、辽宁等地区出现较多的配额盈余,而北京、天津、上海、江苏、浙江、安徽等地区由于碳排放历史责任和转移责任较大出现配额不足,这些省份经济发展水平和能源利用效率很高,有能力进一步减少碳排放,而且低碳城市试点和碳排放权交易试点政策能够有效激励区域内企业进行碳减排。

表5 基于公平与效率综合原则的碳配额分配结果 单位:万吨

地 区	综合原则 碳配额	2030 年 碳排放	差值 2030 年—综合	地 区	综合原则 碳配额	2030 年 碳排放	差值 2030 年—综合
北京	18652.57	11395.72	-7256.85	河南	77116.82	65319.76	-11797.06
天津	24430.68	20836.23	-3594.45	湖北	55026.37	41753.59	-13272.78
河北	73481.92	119767.44	46285.52	湖南	45062.86	38544.19	-6518.67
山西	32299.36	66995.22	34695.86	广东	114875.24	67538.56	-47336.68
内蒙古	44055.01	84504.72	40449.71	广西	35689.55	26554.88	-9134.67
辽宁	48898.86	69880.09	20981.23	海南	7061.55	4597.42	-2464.13
吉林	34447.15	29497.67	-4949.48	重庆	23798.53	19382.50	-4416.03
黑龙江	29446.09	36177.12	6731.03	四川	53855.14	38879.93	-14975.21
上海	37211.29	26133.62	-11077.67	贵州	21349.22	32250.08	10900.86
江苏	108914.97	98906.70	-10008.27	云南	30770.34	24099.95	-6670.39
浙江	72807.24	48484.18	-24323.06	陕西	32386.78	33844.58	1457.80
安徽	67668.08	47864.20	-19803.88	甘肃	17404.93	20323.33	2918.40
福建	39492.21	29528.18	-9964.03	青海	6314.46	6215.04	-99.42
江西	28840.12	28009.31	-830.81	宁夏	9466.68	20494.78	11028.10
山东	107624.36	112977.15	5352.79	新疆	21483.07	49175.34	27692.27

四、不同分配方案的减排成本比较

不同分配方案下各地区均有不同程度的碳配额盈余或不足,盈余的碳配额可以为排放主体带来收益,配额的不足则会成为经济主体的减排负担。碳减排成本通常用影子价格来衡

量,是指在一定生产水平下,排放主体为减少一单位碳排放所必需的要素投入增加或期望产出减少量 (Lee 和 Zhang, 2012)。

1. 边际减排成本和总减排成本

采用 SBM-DEA 模型的利润最大化函数模型计算边际减排成本 (刘明磊等, 2011; Duan 等, 2018)。基于 Charnes-Cooper 变换,对模型 (10) 求利润最大化的优化模型:

$$\begin{aligned} \max A = & \sum_{m=1}^M p_{mi} y_{mi} - \sum_{n=1}^N p_{ni} x_{ni} - \sum_{r=1}^R p_{ri} CO_{2ri} \\ s. t. & \begin{cases} A \leq 0 \\ p_{mi} \geq \frac{1+A}{M+R} \left(\frac{1}{y_{mi}} \right) \\ p_{ni} \geq \frac{1}{N} \left(\frac{1}{x_{ni}} \right) \\ p_{ri} \geq \frac{1+A}{M+R} \left(\frac{1}{CO_{2ri}} \right) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

求解得到减排成本:

$$r_{ci} = -r_{yi} \cdot \frac{\partial \vec{D}_0(x, y, CO_2; g_y, g_a) / \partial CO_2}{\partial \vec{D}_0(x, y, CO_2; g_y, g_a) / \partial y} = -r_{yi} \cdot \frac{p_{mi}}{p_{ri}} = mac_i \quad (15)$$

其中, p_{mi} 、 p_{ni} 、 p_{ri} 分别为期望产出 (GDP)、投入要素、非期望产出 (碳排放) 的影子价格。 r_{yi} 代表经济产出的市场价格,参考 Duan 等 (2018)、王文举和陈真玲 (2019)、黄煌 (2020)、闫庆友等 (2020) 的研究,将 r_{yi} 设定为 1 元,则每个地区的边际减排成本可通过非期望产出的影子价格与期望产出的影子价格相除得到,代表区域 i 为了减少一单位非期望产出而愿意放弃的期望产出情况。随着碳排放权交易市场的启动和逐步完善,碳排放权可以在不同主体之间进行交易,即实际碳排放和碳配额之间存在差值,因此区域 i 的碳减排总成本为:

$$TC_i = \sum (CO_{2\text{实际}} - CO_{2\text{配额}}) \cdot mac_i \quad (16)$$

各地区的碳减排总成本也可能是总收益,即碳配额大于实际碳排放的情况下,产生的剩余碳配额可以进行市场交易从而获得额外收益,这也是鼓励和支持各地区倡导节能减排理念、进行技术升级和设备更新改造的重要动力。

2. 不同分配方案的减排成本比较

在公平性优先、效率性优先和综合原则三种分配方案下,各省级区域的减排成本见表 6。

不同分配原则下各省份间的边际减排成本差异较大,对于北京、上海、江苏、浙江、广东等碳排放强度较低的东部或沿海地区,效率性优先原则下边际减排成本较高,公平性优先原则下边际减排成本较低,综合原则下边际减排成本居中;而对于山西、辽宁、黑龙江、贵州、甘肃、新疆等碳排放强度较高的西部地区,公平性优先原则下边际减排成本较高,效率性优先原则下边际减排成本较低。

对于总减排成本,整体而言效率性优先原则下各地区的成本最低,但山西、内蒙古、宁夏、安徽等煤炭产地面临过高的减排成本;公平原则下省际的总减排成本差异非常大,内蒙

古、河北、山西、新疆等地区的总减排成本超过 20 万亿元，而广东、四川等地区的总减排收益超过 10 万亿元；在综合分配原则下，超过半数的省份可以拥有减排收益，这将极大提升减排动力，随着全国碳交易市场的逐步建成和完善，这种碳排放权分配方案更具可持续性。

表 6 不同分配方案的减排成本比较 (单位: 亿元)

地 区	公平原则		效率原则		综合原则	
	边际减排成本	总减排成本	边际减排成本	总减排成本	边际减排成本	总减排成本
北京	2.9409	-18124.09	3.3350	-28403.12	3.1241	-22670.88
天津	3.2369	-0.42	4.4384	-34322.59	3.7954	-13642.35
河北	6.2600	242148.08	4.9971	275043.90	5.6730	262578.88
山西	7.6636	221439.54	5.1531	213213.41	6.4967	225407.70
内蒙古	6.1149	265365.76	7.0580	261541.21	6.5532	265074.20
辽宁	4.9273	67094.51	3.5398	104284.78	4.2824	89849.68
吉林	4.9489	11495.97	7.7982	-103898.13	6.2732	-31049.05
黑龙江	4.8223	19880.04	3.9779	38723.81	4.4298	29817.00
上海	2.9170	-10898.96	4.4593	-87094.05	3.6338	-40254.25
江苏	3.7770	-26121.81	4.0145	-54471.82	3.8874	-38905.88
浙江	3.6502	-51024.00	4.9508	-179389.86	4.2547	-103487.93
安徽	5.5626	-33024.92	8.6472	-309319.77	6.9963	-138554.14
福建	3.8699	-48094.38	3.3810	-24096.83	3.6426	-36295.18
江西	5.5190	-19318.21	4.5129	10122.68	5.0513	-4196.71
山东	4.1223	-15419.00	3.4314	54295.27	3.8012	20346.81
河南	5.1592	-24984.40	6.2594	-123966.76	5.6706	-66896.59
湖北	4.8833	-76152.33	4.4580	-47252.39	4.6856	-62191.41
湖南	5.1331	-55610.04	4.1681	-6461.45	4.6846	-30537.21
广东	3.5798	-159701.85	3.7671	-190141.33	3.6669	-173578.73
广西	5.4159	-57531.22	4.9496	-36732.91	5.1992	-47492.71
海南	4.7010	-11719.81	4.6597	-11327.00	4.6818	-11536.58
重庆	4.7927	-27427.35	4.2560	-12391.13	4.5432	-20063.06
四川	5.1004	-120960.04	3.5681	-17522.25	4.3882	-65714.09
贵州	8.2842	56211.19	5.4036	84510.46	6.9452	75708.62
云南	5.9915	-39502.34	6.0238	-40717.25	6.0064	-40065.25
陕西	5.4973	8555.59	5.5335	7438.92	5.5142	8038.59
甘肃	6.7250	10169.18	5.6434	25607.96	6.2223	18159.26
青海	6.3728	7323.86	9.7524	-14991.52	7.9436	-789.79
宁夏	11.8320	141685.51	14.6607	145698.14	13.1468	144984.62
新疆	7.6294	209158.45	7.4198	207841.03	7.5318	208572.10
平均	5.3810	15497.08	5.4739	3527.38	5.4242	13353.8557

五、研究结论与政策建议

本文将公平、效率、责任、发展等多项原则纳入中国省域碳配额分配方案中,设计了公平性优先、效率性优先、兼顾公平与效率的三种分配方案,并且比较不同分配方案的减排成本,研究发现:

第一,经济发展起步早、工业集聚水平高、煤炭能源消耗量大的省份向能源匮乏或经济欠发达省份转移了较多的碳排放,公平性优先原则的碳排放权分配方案中,个别地区出现碳配额短缺是因为需要承担历史责任和转移责任,是对地区间“共同而有区别责任”的更好阐释,这种分配方案的优势在于既有惩罚机制又能兼顾地区经济可持续发展。

第二,碳配额作为一种权利在不同地区之间具有竞争性,基于效率原则采用产出导向、规模报酬不变的 ZSG-SBM 模型制定碳配额分配方案,经过五次迭代后更多地区达到了技术效率前沿,并且其他地区的投入产出效率也有所提升,这种分配方案的优势在于能够体现出国家统筹下地区间的协同性。

第三,采用熵值法整合以上两种碳配额分配方案能够兼顾公平性与效率性,优势在于既能激发区域减排积极性,又不会因碳排放历史责任和转移责任惩罚过度而损失效率。大部分地区在综合性原则下的减排成本居中,而且超过半数的省份可以获得减排收益。

一般而言,公平性优先原则的碳排放权分配方案有利于经济欠发达地区,效率性优先原则的碳排放权分配方案有利于经济发展水平较高的地区,兼顾公平与效率原则的碳排放权分配方案因地区间减排成本差异小而容易被更多主体所接受,最适合中国当前情况。未来随着我国经济发展不平衡、不充分问题的缓解,地区间差异逐渐缩小,可以推行效率性优先原则下的碳配额分配方案,追求更低的减排成本。本文提出的分配方案可以借助计算机软件编程计算出各主体的碳配额,并进行参数的动态调整以适应不同情景下的变化,也可以推广应用到同一个省内不同市区县间的碳排放权分配中,在基期设定、分配原则、分配方法、减排成本控制等方面为区域碳排放账户的核算提供参考和借鉴。根据研究结论,提出以下政策建议:

首先,亟待完善全国统一碳排放权交易市场的运行机制,制定兼具公平性、效率性、可持续性和可操作性的碳配额分配方案是基础和前提。我国从 2011 年开始陆续设立北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳及福建共 8 个试点碳排放权交易市场,基本免费向各排放主体分配初始碳配额,分配方法主要采用历史法或标杆法,并针对未按时按量履约的企业实施适当的惩罚机制。2021 年开始启动全国碳排放权交易市场,采用以强度控制为基本思路的行业基准法和历史强度法分配碳配额,但当前实践中的分配方法未设置地区修正系数,忽略地区碳排放历史责任和转移责任的分配方案会影响分配的公平性和减排的积极性。

其次,根据不同地区间发展阶段、经济实力、资源禀赋、产业布局等方面的差异,制定差别化、包容式的协调发展和减排计划,以保障 2030 年全国碳达峰目标的顺利实现。鼓励北京、上海、江苏、广东等经济发展水平较高的省份通过产业转型和绿色升级减少碳排放,支持四川、重庆、贵州、内蒙古等水力、电力、太阳能等可再生资源丰富的地区加快能源转型进程,推动单位 GDP 能耗快速下降,严格控制能源消费总量增长。本文还发现各地区的碳排放具有显著的空间溢出效应,因此应该总结先进减排经验推广至其他地区,形成政策合力以及加强地区间的协同减排效应。

最后,推动有效市场和有为政府更好结合,将实现碳达峰作为推动经济高质量发展、构

建新发展格局的重要抓手。本文采用扩展的 STIRPAT 模型分析各省份碳排放的影响因素时引入了环境规制强度,但结果并未通过显著性检验,应该在政府监管的基础上引入市场的价格调节机制、多主体的监督机制以及严格的惩罚机制,激发市场主体的活力和积极性,例如实施金融支持绿色低碳发展专项政策、设立碳减排支持工具、完善能源消费强度和总量的双控制度等,还可以参考借鉴排污许可证制度,引入拍卖机制充分激发各主体的碳减排积极性。

参 考 文 献

- [1] Choi, Y., Ning, Z., Zhou, P., 2012, *Efficiency and Abatement Costs of Energy-related CO₂ Emissions in China: A Slacks-based Efficiency Measure* [J], *Applied Energy*, 98, 198~208.
- [2] Duan, F. M., Wang, Y., Wang, Y., Zhao, H., 2018, *Estimation of Marginal Abatement Costs of CO₂ in Chinese Provinces Under 2020 Carbon Emission Rights Allocation: 2005—2020* [J], *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (24), 24445~24468.
- [3] Gao, C., Ge, H., Lu, Y., Wang, W., Zhang, Y., 2021, *Decoupling of Provincial Energy-Related CO₂ Emissions From Economic Growth In China and its Convergence from 1995 to 2017* [J], *Journal of Cleaner Production*, 297, 126627.
- [4] Gomes, E. G., Lins, M. P., 2008, *Modelling Undesirable Outputs with Zero Sum Gains Data Envelopment Analysis Models* [J], *Journal of the Operational Research Society*, 59 (5), 616~623.
- [5] Han, F., Xie, R., Lu, Y., Fang, J., Liu, Y., 2018, *The Effects of Urban Agglomeration Economies on Carbon Emissions: Evidence from Chinese Cities* [J], *Journal of Cleaner Production*, 172, 1096~1110.
- [6] Höhne, N., Elzen, M. D., Escalante, D., 2014, *Regional GHG Reduction Targets Based on Effort Sharing: A Comparison of Studies* [J], *Climate Policy*, 14 (1), 122~147.
- [7] Hu, Y. J., Han, R., Tang, B. J., 2017, *Research on the Initial Allocation of Carbon Emission Quotas: Evidence from China* [J], *Natural Hazards*, 85 (2), 1189~1208.
- [8] Lee, M., Zhang, N., 2012, *Technical Efficiency, Shadow Price of Carbon Dioxide Emissions, and Substitutability for Energy in the Chinese Manufacturing Industries* [J], *Energy Economics*, 34 (5), 1492~1497.
- [9] Lins, M. P. E., Gomes, E. G., Mello, J. C. S., Mello, A. J. S., 2003, *Olympic Ranking Based on a Zero Sum Gains Dea Model* [J], *European Journal of Operational Research*, 148 (2), 312~322.
- [10] Meinshausen, M., Jeffery, L., Guetschow, J., Pont, Y. R., Rogelj, J., Schaeffer, M., Höhne, N., Elzen, M. D., Oberthür, S., Meinshausen, N., 2015, *National Post-2020 Greenhouse Gas Targets and Diversity-Aware Leadership* [J], *Nature Climate Change*, 5, 1098~1106.
- [11] Tone, K., 2010, *Variations on the Theme of Slacks-Based Measure of Efficiency in DEA* [J], *European Journal of Operational Research*, 200 (3), 901~907.
- [12] Tone, K., 2001, *A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis* [J], *European Journal of Operational Research*, 130 (3), 498~509.
- [13] Xu, L., Chen, N. C., Chen, Z. Q., 2017, *Will China Make a Difference in its Carbon Intensity Reduction Targets By 2020 and 2030?* [J], *Applied Energy*, 203, 874~882.
- [14] Yan, Q. Y., Wang, Y. X., Baležentis, T., Sun, Y. K., Streimikiene, D., 2018, *Energy-Related CO₂ Emission in China's Provincial Thermal Electricity Generation: Driving Factors and Possibilities for Abatement* [J], *Energies*, 11 (5), 1096~1120.
- [15] 陈诗一:《边际减排成本与中国环境税改革》[J],《中国社会科学》2011年第3期。
- [16] 陈真玲:《生态效率、城镇化与空间溢出——基于空间面板杜宾模型的研究》[J],《管理评论》2016年第11期。

- [17] 范剑勇：《产业集聚与地区间劳动生产率差异》[J]，《经济研究》2006 年第 11 期。
- [18] 方恺、张琦峰、叶瑞克、周云亨：《巴黎协定生效下的中国省际碳排放权分配研究》[J]，《环境科学学报》2018 年第 3 期。
- [19] 郭际、刘慧、吴先华、王莹莹：《基于 ZSG-DEA 模型的大气污染物排放权分配效率研究》[J]，《中国软科学》2015 年第 11 期。
- [20] 郭文、刘小峰、吴孝灵：《中国“十三五”时期省际碳减排目标的效率分配》[J]，《中国人口·资源与环境》2017 年第 5 期。
- [21] 郭文、孙涛、朱建军：《基于“零和收益”的 SBM 效率分配方法及应用》[J]，《运筹与管理》2020 年第 2 期。
- [22] 何文举、张华峰、陈雄超、颜建军：《中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究——基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角》[J]，《南开经济研究》2019 年第 2 期。
- [23] 胡鞍钢：《中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径》[J]，《北京工业大学学报（社会科学版）》2021 年第 3 期。
- [24] 黄煌：《2030 年碳强度目标约束下中国省域碳排放总量分配——基于边际减排成本效应视角的分析》[J]，《调研世界》2020 年第 7 期。
- [25] 林坦、宁俊飞：《基于零和 DEA 模型的欧盟国家碳排放权分配效率研究》[J]，《数量经济技术经济研究》2011 年第 3 期。
- [26] 令狐大智、武新丽、叶飞：《考虑双重异质性的碳配额分配及交易机制研究》[J]，《中国管理科学》2021 年第 3 期。
- [27] 刘海英、王钰：《基于历史法和零和 DEA 方法的用能权与碳排放权初始分配研究》[J]，《中国管理科学》2020 年第 9 期。
- [28] 刘明磊、朱磊、范英：《我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计：基于非参数距离函数方法》[J]，《中国软科学》2011 年第 3 期。
- [29] 邵帅、张可、豆建民：《经济集聚的节能减排效应：理论与中国经验》[J]，《管理世界》2019 年第 1 期。
- [30] 石敏俊、王妍、张卓颖、周新：《中国各省区碳足迹与碳排放空间转移》[J]，《地理学报》2012 年第 10 期。
- [31] 孙立成、程发新、李群：《区域碳排放空间转移特征及其经济溢出效应》[J]，《中国人口·资源与环境》2014 年第 8 期。
- [32] 田云、林子娟：《巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究》[J]，《自然资源学报》2021 年第 4 期。
- [33] 王倩、高翠云：《公平和效率维度下中国省际碳权分配原则分析》[J]，《中国人口·资源与环境》2016 年第 7 期。
- [34] 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 年第 3 期。
- [35] 王文举、李峰：《我国统一碳市场中的省际间配额分配问题研究》[J]，《求是学刊》2015 年第 2 期。
- [36] 王勇、贾雯、毕莹：《效率视角下中国 2030 年二氧化碳排放峰值目标的省区分解——基于零和收益 DEA 模型的研究》[J]，《环境科学学报》2017 年第 11 期。
- [37] 闫庆友、桂增侃、张文华、陈立忠：《中国能源影子价格和能源环境效率省际差异》[J]，《资源科学》2020 年第 6 期。
- [38] 叶琴、曾刚、戴劭劼、王丰龙：《不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响——基于 285 个地级市面板数据》[J]，《中国人口·资源与环境》2018 年第 2 期。
- [39] 原毅军、耿殿贺：《环境政策传导机制与中国环保产业发展——基于政府、排污企业与环保企业的博弈研究》[J]，《中国工业经济》2010 年第 10 期。
- [40] 张浩然、李玮：《区域碳排放权减排分配机制设计——基于 1.5℃ 温升目标》[J]，《科技管理研

究》2020年第14期。

[41] 张可、汪东芳：《经济集聚与环境污染的交互影响及空间溢出》[J]，《中国工业经济》2014年第6期。

[42] 周迪、王文捷、陈梓佳：《基于配额指标重要性视角的中国碳排放配额再分配》[J]，《中国环境科学》2020年第12期。

[43] 朱潜挺、吴静、洪海地、王铮：《后京都时代全球碳排放权配额分配模拟研究》[J]，《环境科学学报》2015年第1期。

Analysis on China's Provincial Carbon Quota Allocation Based on the 2030 Carbon Peak Goal

Wang Wenju¹ Kong Xiaoxu²

- (1. Institute for Carbon Peak and Neutrality, School of Economics, Beijing Wuzi University;
2. School of Economics, Capital University of Economics and Business)

Research Objectives: Based on the goal of peak carbon dioxide emissions in 2030, many principles such as fairness, efficiency, responsibility and development are incorporated into the interregional carbon emission rights allocation scheme. **Research Methods:** Spatial simultaneous model, zero-sum game SBM model and entropy weight method are used to construct carbon quota allocation schemes under different principles. **Research Findings:** The comprehensive carbon quota allocation scheme taking into account the principle of fairness and efficiency is easily accepted by more subjects due to the small difference in emission reduction costs between regions, which is most suitable for China's current situation. **Research Innovations:** The designed carbon quota allocation scheme integrates the principle of sustainable development on the basis of fairness principle, and integrates the idea of zero-sum game on the basis of efficiency principle, which has fairness, efficiency, sustainability and operability. **Research Value:** The formulation of a reasonable allocation scheme of regional initial carbon quotas is of great significance for promoting the coordinated emission reduction strategy among provinces, establishing and improving the national unified carbon trading market, and achieving the goal of peak carbon dioxide emissions in 2030.

Key Words: Carbon Peak; Carbon Quota; Cost of Emission Reduction; Spatial Simultaneous Model; ZSG-SBM Model

JEL Classification: C31; C67; Q54; Q56

(责任编辑: 彭 战)