水保碳汇研究

2030 年中国主要省域间碳排放配额分配

王 莉[1,2], 刘莹莹[1,2], 姜惠源[1]

(1.郑州大学 生态与环境学院 河南 郑州 450001; 2.河南省减污降碳协同工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘 要:[目的] 在控制碳排放总量条件下,对省域间碳排放配额进行公平科学地分配是实现"双碳"目标的关键途径,也是碳排放交易机制体系的重要基石。分析不同情景下碳排放配额分配结果的碳减排边际成本,以期以最小成本确定最优的碳排放配额分配方案,为区域后期开展分配工作提供理论基础,为地区碳减排方案制定提供工作参考。[方法] 在前人建立的碳配额分配指标基础上引入生态性指标,并设置公平、效率、生态、兼顾公平—生态—效率 4 种情景,利用 SBM(slacks-based measure)对偶模型测算不同情景下区域碳边际减排成本,并以此为依据确定最优分配方案。[结果] 在公平、效率、生态、兼顾情景下平均碳边际减排成本分别为2 950,3 120,2 910,3 090 元/t,引入生态性指标的方案减排成本明显更低,可推断出是碳汇抵消掉部分减排难度较大、成本较高的碳排放所致;兼顾情景下减排成本明显高于公平、生态情景,表明碳排放效率的提升同时会导致碳边际减排成本增加。[结论] 生态情景下的碳排放配额是以最低碳边际减排成本实现"双碳"目标的最优方案,可以作为地区碳排放方案制定的参考。

关键词: 碳排放配额; 生态情景; SBM(slacks-based measure)对偶模型; 碳边际减排成本

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2023)05-0279-09 **中图分类号:** X32

文献参数: 王莉, 刘莹莹, 姜惠源.2030 年中国主要省域间碳排放配额分配[J].水土保持通报,2023,43(5):279-287.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.033; Wang Li, Liu Yingying, Jiang Huiyuan. Carbon emission quota allocation among main provinces of China in 2030 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):279-287.

Carbon Emission Quota Allocation Among Main Provinces of China in 2030

Wang Li[1,2], Liu Yingying[1,2], Jiang Huiyuan[1]

(1.*College of Ecology and Environment*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou*, *Henan* 450001, *China*; 2.*Henan Collaborative Engineering Technology Research Center for Carbon Reduction and Pollution Reduction*, *Zhengzhou*, *Henan* 450001, *China*)

Abstract: [Objective] Under total carbon emission control, an equitable and scientific allocation of carbon emission quota among provinces of China is a key approach for achieving the "dual carbon" goal, as well as an important cornerstone of the carbon emission trading system. The marginal cost of carbon emission reduction was analyzed under different scenarios with regard to the results of carbon emission quota allocation in order to determine the optimal carbon emission quota allocation scheme at the lowest cost, thereby providing a theoretical basis for subsequent regional allocation work and a reference for the formulation of regional carbon emission reduction schemes. [Methods] An ecological index was introduced based on the carbon quota allocation index established in previous studies. Four scenarios (including equity, efficiency, ecology, and balanced equity-efficiency-ecology) were evaluated. The slacks-based measure (SBM) dual model was used to calculate the regional marginal carbon emission reduction cost under different scenarios, and the optimal allocation scheme was determined based on these results. [Results] Under the scenarios of equity, efficiency, ecology and balanced, the average marginal costs of carbon emission reduction were 0.295 million yuan/t, 0.312 million yuan/t, 0.291 million yuan/t, and 0.309 million yuan/t, respectively. When the ecological index was introduced, the emission reduction cost of the scheme was significantly lower, and it can be inferred that the carbon sink offsets a portion of the carbon emissions that are more difficult and costly to reduce. The cost of emission reduction under the balanced scenario was significantly higher than under the equity and ecology

收稿日期:2023-04-30 **修回日期:**2023-06-16

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项"清潩河(许昌段)多目标多部门综合管理决策平台及水环境功能恢复综合示范子课题"(2015ZX07204-002-05)

第一作者:王莉(1973—),女(汉族),河南省长垣市人,博士,教授级高级工程师,主要从事环境管理与规划研究。Email:xiawangli@zzu.edu.cn。

scenarios, indicating that improvement in carbon emission efficiency will lead to an increase in marginal carbon emission reduction cost. [Conclusion] The carbon emission quota under the ecology scenario was the best scheme for achieving the "dual carbon" goal with the lowest marginal carbon emission reduction cost, and can be used as a reference for the formulation of regional carbon emission plans.

Keywords: carbon emission quotas; ecological scenario; slacks-based measure (SBM) dual model; marginal cost of reducing carbon emissions

据《BP 世界能源统计年鉴》,2020 年中国碳排放总量达 9.90×10^{9} t,同比增长 0.71%,在全球总量比例已达 31%,连续第 4 a 呈增长趋势,是世界最大的碳排放量国家之一[1-2]。且 1751 年至今,中国累计碳排放量达 2.00×10^{11} t,占全球总量的 12.7%,实现"双碳"目标具有巨大挑战[3]。但与此同时,中国也在积极应对气候变化,2015 年在巴黎国际气候大会上就已经宣布在 2030 年碳排放强度要比 2005 年下降 60%~65%。2020 年,中国国家领导人在第七十五届联合国大会上明确强调:中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和目标。在碳排放总量控制的基础上,公平合理地限制各地区碳排放配额是中国现阶段实现"双碳"目标的必要途径和关键举措[4-6]。

目前,国内外对碳排放配额分配研究主要侧重于分配原则和分配方法两个层面。在分配原则层面,主要聚焦于公平性原则、效率性原则等,如 Yang Yuan 等[7]分别研究了公平、效率性原则下的配额分配,结果表明经济能力、碳排放和减排潜力相对较低的地区配额相对较低;王勇等[6]将公平、效率及可行性原则相结合,得到经济发展水平和历史碳排放量处于全国前列的省份会相应的得到较多的碳排放配额;Chang Liyue 等[8]结合公平与效率原则建立两阶段分配模型,对环渤海经济圈配额进行分配,结果表明天津、河北和辽宁碳排放空间缺乏,北京和山东碳排放空间盈余。在分配方法层面,主要以指标法和模型法为主。如 Zhou Xing 等[9]学者认为森林碳汇作为联合国气候变化框架公约中的一种减排方法,采用森林覆盖率作为碳排放配额的调整指标以体现区域环境水平;Chen Liyuan 等[10]结合零和收益 DEA(ZSG-DEA, Zero sum gains-data envelopment analysis)及方向距离函数建立 ZSG-DDF(zero sum gains-data digital distribution frame)模型,从效率最大化的角度研究区域配额分配;Cheng Yonglong 等[11]通过数据包络分析(DEA, date envelopment analysis)模型、环境基尼系数及方法对分配方案的效率和公平性进行评价;Kong Yingchao 等[12]采用 DEA 与信息熵结合的方式对各省区碳排放配额进行分配,结果表明排放量较大的省份和地区需要进一步提高排放效率。

众多学者多从成本角度考虑,在不同分配方案中选出最优解,并期望以全社会最小经济成本实现既定减排目标。从当前研究基础来看,边际减排成本则是最具代表性指标,即减少单位碳排放所必须舍弃的经济产出的价值,该指标的核算有助于准确评估目前相应的碳减排政策,促进减排降碳相关政策进一步优化[13]。Choi[14]采用非参数效率分析估算中国能源相关的碳排放能源效率、潜在减排量,并采用基于非径向松弛的数据包络分析模型估计碳排放的潜在减排量的效率和边际减排成本。Duan Fumei[15]基于 3 个假设采用 ZSG-C-DDF 模型估算各省三大行业碳边际减排成本,结果表明大多数省份的第二产业边际减排成本较低。碳边际减排成本的研究可为"双碳"目标下的环境政策制定提供有力参考。总体来看,在开展区域间碳配额分配研究中,大多忽略了区域生态系统碳汇能力差异,导致分配结果不够均衡全面,即使参考指标涉及生态领域,也仅停留于森林覆盖率等宏观层面,导致难以精准反映区域生态系统碳汇能力;此外,以往设置情景大多仅关注公平和效率因素,导致生态情景缺失,且多情景下分配模型单一,未充分考虑模型与情景适配性。为弥补相关研究空缺,本文在前人研究基础上,增加生态性原则,引入森林、农田碳汇量两个指标,设置"生态情景"与"综合兼顾情景"开展区域间碳排放配额分配,并根据不同情景特征匹配不同方法开展分配,通过 SBM(slacks-based measure)对偶模型分析比较不同情景下碳排放配额分配结果的碳减排边际成本,以期以最小成本确定最优的碳排放配额分配方案,为区域后期开展分配工作提供理论基础,为地区碳减排方案制定提供工作参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究范围

本研究针对中国省域间开展碳排放配额分配,范围包括除西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区及台湾地区以外的 30 个省份。

1.2 碳排放配额总量确定

碳排放配额总量的控制目标是实现"2030 年左右达到碳排放峰值,2060 年左右实现碳中和"的必然要求,设定明确的碳排放总量配额目标有助于协调现有

能源、环境等约束性指标,是完善全国碳排放交易市场的基础。本文中 2030 年碳排放强度根据国家发布的《2030 年碳达峰行动方案》[16]中的减排方案(2030 年碳排放强度较 2005 年下降 65%)来确定,参考孔颖超的研究,则 2030 年国家碳排放强度计算公式为[17]:

$$I_{2030}=(1-65\%)\times I_{2005} \tag{1}$$

式中:I_{2030}表示 2030 年碳排放强度(t/万元);I_{2005}表示 2005 年碳排放强度(t/万元)。

本文将"十四五"时期生产总值(GDP)指标的年均增速目标与灰色预测模型 GM(1,1)结合预测 2030 年 GDP 值。最后,碳排放配额总量通过 2030 年碳排放强度以及 GDP 预测值确定,参考孔颖超的研究,则 2030 年碳排放配额总量计算公式为[17]:

$$E_{2030}=I_{2030}\times \mathrm{GDP}_{2030} \tag{2}$$

式中:E_{2030}表示 2030 年碳排放配额(t);GDP_{2030}表示 2030 年 GDP 总量(t)

1.3　情景设置与指标确定

1.3.1　情景设置　研究碳排放配额分配目的是限制地区碳排放总量,促进地区进行"碳减排"与"碳中和"工作,最终实现"双碳"目标。为建立更加综合全面、可落实的区域碳排放配额分配方案,本文根据不同情景侧重方向,设置 4 种情景开展区域碳排放配额分配研究,最终比较筛选出最优的分配方案。

(1) 情景 1:公平情景。此情景下主要关注地区的减排责任、减排能力与减排潜力,主要根据地区经济、人口、能源、排放等实际情况,关注地区整体发展状况,实现区域碳排放配额分配相对公平。

(2) 情景 2:效率情景。此情景下以碳排放配额总量不变为条件,以地区经济发展为目的,在保障地区经济总量较好发展势头,一定程度牺牲地区内部发展的平衡性,最终实现效率最大化的碳排放配额分配。

(3) 情景 3:生态情景。此情景下强调生态系统碳吸收对碳排放的中和能力,帮助部分地区将其碳汇优势转化为配额优势,进而转化为经济及发展优势,考虑地区可持续发展的长远利益。

(4) 情景 4:兼顾公平—生态—效率情景。此情景下综合考虑情景 1,2,3 下各方面的因素,以期望实现更加综合全面的碳排放配额分配。

1.3.2　分配指标体系确定　在已有的碳排放配额分配研究中,公平性原则、效率性原则、可行性原则被广泛应用[6,18-19]。公平性原则指标多为历史碳排放量、人口、GDP,其中历史碳排放量体现地区减排责任,其与碳排放配额呈负相关,从人际公平和区域公平视角来看,人口数量越多,GDP 越高,碳排放配额分配更多[20]。效率性原则指标多为碳排放强度和能源强度,两者与碳排放配额呈负相关。可行性原则指标多为第二产业产值比例,其与碳排放配额呈正相关。本文在此基础上引入生态性原则,指标为森林碳汇量、农田碳汇量,代表地区碳中和能力,其与分配碳排放配额呈正相关;参考丁仲礼[21]认为人均累计碳排放量最能体现公平性原则的观点,本文用人均累计碳排放量代替历史碳排放量。具体指标体系见表 1。

表 1　碳排放配额分配指标体系

Table 1　Index system of carbon emission quota allocation

原 则	指 标	相关性
公平性原则	人均累计碳排放量/10^4 t	−
	人口/万人	+
	GDP/亿元	+
效率性原则	碳排放强度(t/万元)	−
	能源强度(t/万元,以标准煤计)	−
保障性原则	森林生态系统碳汇量/10^4 t	+
	农田生态系统碳汇量/10^4 t	+
生态性原则	第二产业产值比例/%	+

注:"+"代表该指标量与碳排放配额呈正相关,"−"代表该指标量与碳排放配额呈负相关。

1.4　区域间碳排放配额分配

1.4.1　公平情景下区域间碳排放配额分配　由于指标类型不同,考虑因素较多,为使权重计算结果更为客观,因此采用信息熵-CRITIC 权重模型进行分配。基于此,选取人均累计碳排放量(减排责任)、人口和 GDP(平等主义)、碳排放强度和能源强度(减排能力)、第二产业比例(减排潜力)6 个指标在公平情景下进行碳排放配额分配。

(1) 信息熵是根据标准值差异程度进行赋权,得出各指标相应权重,相对变化程度大的具有较大的权重。参考周小惠[22]的研究,具体步骤为:

①数据标准化:采用最大最小标准化法对数据进行标准化操作,将各指标由绝对值变为相对值,并且消除量纲对结果的影响。

正向指标和负向指标分别采用公式(3)—(4)标准化[22],

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_i)}{\max(x_i)-\min(x_i)} \tag{3}$$

$$x'_{ij}=\frac{\max(x_i)-x_{ij}}{\max(x_i)-\min(x_i)} \tag{4}$$

式中:x_{ij}表示数据矩阵 X 第 i 行第 j 列的数值;x'_{ij}表示标准化后的数据;$\min(x_i)$表示数据矩阵 X 第 i 行最小值;$\max(x_i)$表示数据矩阵 X 第 i 行最大值。

②数据平移[22]：

$$x''_{ij}=x'_{ij}+0.000\ 1 \tag{5}$$

式中：x''_{ij}表示平移后的数据。

③确定各指标概率[22]：

$$p'_{ij}=\frac{x''_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}x''_{ij}} \tag{6}$$

式中：p'_{ij}表示各指标概率。

④确定各指标信息熵[22]：

$$e_{ij}=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}p'_{ij}\ln p'_{ij} \tag{7}$$

式中：e_{ij}表示各指标概率。

⑤确定各指标信息效用值[22]：

$$g_j=1-e_{ij} \tag{8}$$

式中：g_j 表示各指标信息效用值。

⑥确定各指标权重[22]：

$$w_{j1}=\frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m}g_j} \tag{9}$$

式中：w_{j1}表示信息熵方法下各指标权重。

(2) CRITIC 权重法是基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合衡量指标的客观权重。考虑指标变异性大小的同时兼顾指标之间的相关性，并非数字越大就说明越重要，完全利用数据自身的客观属性进行科学评价。参考武振华[23]的研究，具体步骤为：

①数据无量纲化处理：为消除因量纲不同对评价结果的影响，对各指标进行无量纲化处理。正向指标也用公式(3)进行处理，负向指标用公式(4)进行处理[22]。

②数据平移：具体计算公式为(5)[22]。

③计算指标变异性：用标准差来表示各指标的内取值的差异波动情况[23]：

$$\begin{cases}\overline{x_j}=\dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij}\\ S_j=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x_j})^2}{n-1}}\end{cases} \tag{10}$$

式中：x_{ij}表示第 i 行第 j 列指标数值；x_j 表示第 j 列指标数据的均值；S_j 表示第 j 个指标的标准差。

④计算指标冲突性[23]：

$$R_j=\sum_{i=1}^{p}(1-r_{ij}) \tag{11}$$

式中：r_{ij}表示评价指标 i 和 j 之间的相关系数；R_j 表示评价指标 j 与其他指标之间的冲突性。

⑤确定各指标信息量[23]：

$$C_j=S_j\times R_j \tag{12}$$

式中：C_j 表示评价指标 j 在整个评价指标体系中的作用。

⑥确定各指标权重[23]：

$$w_{j2}=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{p}C_j} \tag{13}$$

式中：w_{j2}表示 CRITIC 权重法下各指标权重。

最终指标权重为公式为：

$$w_j=\frac{w_{j1}+w_{j2}}{2} \tag{14}$$

式中：w_j 表示信息熵-CRITIC 模型下各指标权重。

1.4.2 效率情景下区域间碳排放配额分配 ZSG-DEA 模型可将碳排放初始分配通过迭代调整使分配效率达到最大化，是目前效率原则下使用最为广泛的一种方法。本文以 GDP 值、人口、能源消耗量作为产出指标，碳排放配额为投入指标，采用 ZSG-DEA 模型使区域碳排放效率均达到 1.000。参考相关学者研究[24-25]，采用“祖父法”确定区域碳排放初始配额量。

数据包络分析(DEA)模型由 Charnes 和 Cooper[26]创立，表示为产出对投入的比率。主要是以投入指标和产出指标为根据，利用线性规划方法对具有可比性的同类型决策单元(DMU)进行相对有效性评价的一种非参数经济计量方法[27]。之后，Lins 等[28]和 Gomes 等[29]提出零和博弈下的 DEA，即 ZSG-DEA 模型，假设投入/产出值的总和是固定的，用平均分配策略和比例分配策略调节不同 DMU 以达到各省份的 DEA 均有效。采用以下公式进行研究核算[30]：

$$\min\varphi_0$$

$$s.t.\begin{cases}\sum_{i=1}^{N}\lambda y_{ij}\geqslant y_0 & (j=1,2,3\cdots m)\\ \sum_{i=1}^{N}\lambda x_{ik}\left[1+\dfrac{x_{0k}(1-\varphi_0)}{\sum_{i\neq 0}x_{ik}}\right]\geqslant\varphi_0 x_{0k} & (k=1,2,3\cdots K)\\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i=1 & (i=1,2,3\cdots n)\\ \lambda\geqslant 1 & (i=1,2,3\cdots n)\end{cases} \tag{15}$$

$$x'_{ik}=\sum_{i\neq 0}\left[\frac{x_{ik}}{\sum_{i\neq 0}x_{ik}}\times x_{0k}(1-\varphi_0)\right]-x_{ik}(1-\varphi_i) \quad (i=1,2,3\cdots N) \tag{16}$$

式中:x 表示碳排放配额;y 为投入指标;K 为投入要素的个数;m 为产出要素的个数;n 为决策单元 DMU 的个数;λ_i 为第 i 个决策单元 DMU 单元的组合比例;DMU_0 为所有决策单元 DMU 中相对效率最高的单元的效率,相对效率为 φ_0。

1.4.3　*生态情景下区域间碳排放配额分配*　自然碳汇是未来中国应对气候变化、实现"碳达峰""碳中和"最有效的途径之一,也是一种最经济且副作用最少的方法。在公平情景下指标的基础上引入森林生态系统碳汇量、农田生态系统碳汇量两个指标,用于体现区域生态系统的对碳排放的中和能力。

由于生态情景下引入了两个碳汇量指标,指标类型差异化更强,考虑因素更多,因此仍采用信息熵-CRITIC 权重模型进行区域碳排放配额分配。

1.4.4　*兼顾公平—生态—效率情景下区域间碳排放配额分配*　兼顾公平—生态—效率情景综合考虑以上情景下各方面因素,以期望实现更加综合全面的碳排放配额分配方案,是在综合公平及生态情景结果基础上,再采用 ZSG-DEA 模型迭代优化使效率达到最大化。

1.5　碳边际减排成本

在不影响经济发展的情况下,以最小的经济成本实现"双碳"目标更能顺应现实需求。因此,本文采用 SBM 对偶模型,以 2030 年资本存量、能源消耗、劳动力人口作为投入指标,2030 年 GDP 为期望产出指标,2030 年二氧化碳排放配额为非期望产出指标,对 2030 年区域碳排放配额分配后所对应的减排成本进行核算,最终将平均碳边际减排成本最小的分配方式确定为最优方案。

碳边际减排成本通常是通过影子价格来衡量,是指减少一单位二氧化碳的排放需要投入的减排成本。本文采用 SBM 对偶模型测算 3 种情景下 2030 年碳边际减排成本。m 个投入要素 X,q 个非期望产出 B,p 个期望产出 Y,基于线性转换与 Charnes-Cooper 对偶转换即可得到减排成本最小时的优化模型,采用以下公式进行研究核算[31-32]:

$$\max \sum_{j=1}^{p} P_{yj} y_j - \sum_{i=1}^{m} P_{xi} x_i - \sum_{r=1}^{q} P_{br} b_r$$

$$s.t.\begin{cases} \sum_{j=1}^{p} P_{yj} y_j - \sum_{i=1}^{m} P_{xi} x_i - \sum_{r=1}^{q} P_{br} b_r \leqslant 0 & (k=1,2,3\cdots k) \\ P_{xi} \geqslant \dfrac{1}{m x_i} & (i=1,2,3\cdots m) \\ P_{yi} \geqslant \dfrac{1+\sum_{j=1}^{p} P_{yj} y_j - \sum_{i=1}^{m} P_{xi} x_i - \sum_{r=1}^{q} P_{br} b_r}{p+q} \times \dfrac{1}{y_j} & (j=1,2,3\cdots p) \\ P_{br} \geqslant \dfrac{1+\sum_{j=1}^{p} P_{yj} y_j - \sum_{i=1}^{m} P_{xi} x_i - \sum_{r=1}^{q} P_{br} b_r}{p+q} \times \dfrac{1}{b_r} & (r=1,2,3\cdots m) \end{cases} \tag{17}$$

$$\mathrm{spc} = p_j \times \frac{p_{br}}{p_{yr}} \tag{18}$$

式中:x_i 为投入变量;y_j 为期望产出;b_r 为非期望产出;P_{xi} 为各个投入要素的虚拟价格;P_{yj} 为期望产出的虚拟价格;P_{br} 为非期望产出的虚拟价格;p_j 为期望产出的影子价格,参考其他学者的研究[33-34],通常将其标准化为 1;spc 为二氧化碳边际减排成本。

1.6　数据来源

GDP 值、人口、第二产业产值、劳动力人数、固定资产形成投资总额、固定资产投资价格指数数据来源于《中国统计年鉴(2012-2021)》,能源消耗量数据来源于《中国能源统计年鉴(2012—2021)》,森林蓄积量数据来源于《中国统计年鉴(2021)》,各农作物产量数据来源于《中国农村统计年鉴(2021)》,2030 年各省份人口、能源消耗量均通过 G,M(1,1)灰色预测模型利用 2011—2020 年数据完成预测,GDP 通过各省份《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中"十四五"地区生产总值增长目标与 G,M(1,1)灰色预测模型相结合进行预测。由于西藏和中国港澳台地区数据缺失,本文研究范围不包含这些区域。

2　结果与分析

根据 2030 年碳减排目标及所预测 GDP 进行碳排放配额总量估算,得到 2030 年碳排放配额总量为 1.98×10^{10} t。经查证,其他学者[17,25,34-36]的研究结果范围在 $1.33\times10^{10}\sim2.09\times10^{10}$ t 之间,因此认为该研究结果较为合理。

2.1　公平情景下碳排放配额分配结果

(1) 相关指标及权重核算。

(2) 碳排放配额分配结果。将 2030 年碳排放配额总量按公平情景下指标权重进行分配,结果见图 1 和表 2。碳排放配额前 5 省份为广东(1.23×10^9 t,6.21%)、江苏(1.09×10^9 t,5.50%)、山东(9.53×10^8 t,

4.81%)、河南(9.51×10^8 t,4.80%)、浙江(9.05×10^8 t,4.57%),这些地区共有特征为人口基数大,GDP 总量较高,第二产业比例较高,能源强度与碳排放强度处中下游,因此受公平情境下的人口、GDP 值、第二产业权重较高影响,配额分配向这些地区倾斜。碳排放配额后 5 省份为宁夏(1.31×10^8 t,0.66%)、内蒙古(3.31×10^8 t,1.67%)、新疆(3.45×10^8 t,1.74%)、青海(3.71×10^8 t,1.87%)、山西(3.83×10^8 t,1.93%),这些地区整体呈现人均累计碳排放量均较高、低碳技术水平较低、人口基数小,GDP 总量较低的特征。其中宁夏、山西虽第二产业比例较高,但能源强度、碳排放强度较高,致使配额有所减少。建议两地应坚持"开源节流",加强可再生能源利用,进一步提升现有能源利用效率,完善相关政策制定与实施,以应对配额不足带来的发展限制。

表 2 公平情景下各指标权重

Table 2 Weight of each indicator under fair scenario

	指 标	权 重
减排责任	人均累计碳排放量	0.125
平等主义	人口	0.242
	GDP	0.280
减排能力	平均碳排放强度	0.110
	平均能源强度	0.131
减排潜力	第二产业比例	0.112

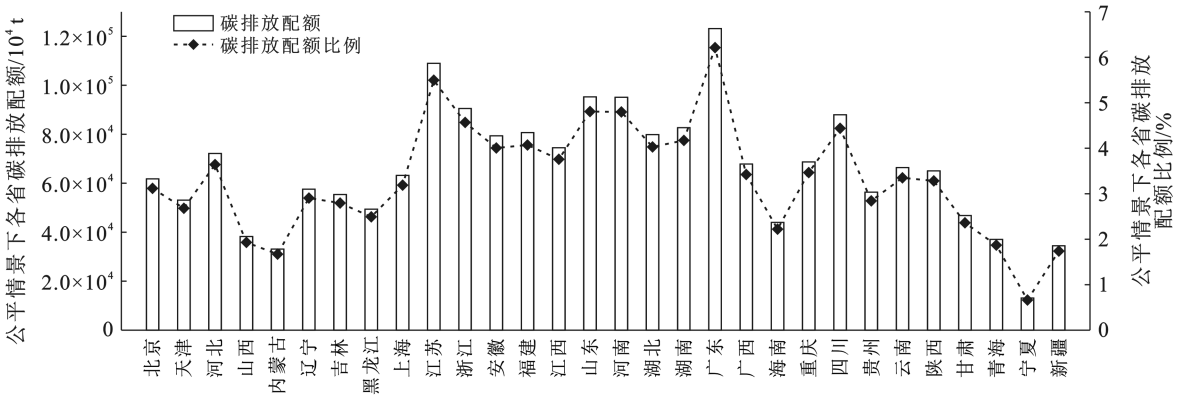

图 1 公平情景下省域间碳排放配额分配结果及比例

Fig.1 Distribution results and proportion of inter-provincial carbon emission quotas under fair scenario

2.2 效率情景下碳排放配额分配结果

效率情景下以效率最大化为目标,采用 ZSG-DEA 模型进行碳排放配额分配,投入指标为碳排放配额,产出指标为各省人口、GDP、能源消耗量。

省域间分配过程效率值变化见图 2。按照历史累计碳排放量比例进行配额分配时,仅 8 个省份效率值达 1.000,使用 ZSG-DEA 模型迭代 3 次后,所有省份效率值均达到 1.000,结果均得到了优化。各省域 2030 年碳排放配额分配结果见图 3。碳排放配额前 5 省份为山东(2.85×10^9 t,14.36%)、广东(1.41×10^9 t,7.09%)、江苏(1.30×10^9 t,6.55%)、内蒙古(1.17×10^9 t,5.91%)、河北(1.10×10^9 t,5.55%),河北、内蒙古偏向于能源供应端,在全国能源供应中占有重要地位,需要更多配额保障其自身发展及其他地区的能源供应;江苏、山东、广东经济发展水平高,整体经济体量大,防止配额过低限制其后期发展。碳排放配额后 5 省份为青海(1.21×10^8 t,0.61%)、海南(1.54×10^8 t,0.77%)、天津(2.05×10^8 t,1.25%)、吉林(2.19×10^8 t,1.11%)、北京(2.47×10^8 t,1.25%),青海以第一产业为主,海南以第三产业为主,北京、天津经济发展水平较高,整体经济体量小,已度过依靠高碳排放维持经济发展的阶段,适当的配额就可保证其后期经济发展。

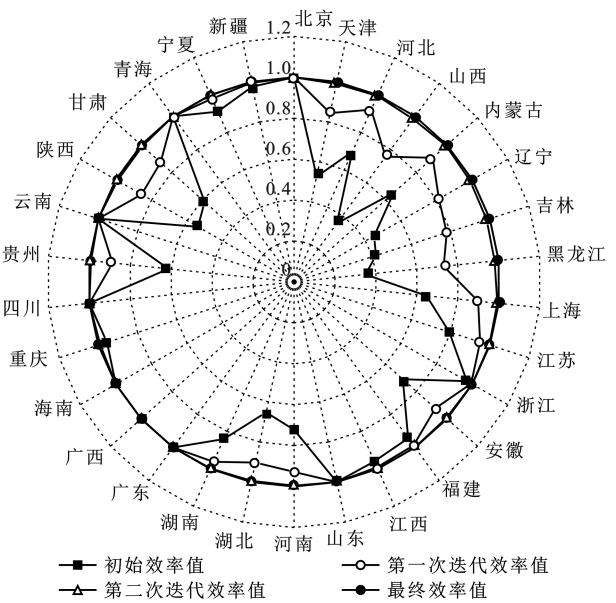

图 2 效率情景下省域间各省域效率值变化

Fig.2 Changes of efficiency values among provinces under efficiency scenario

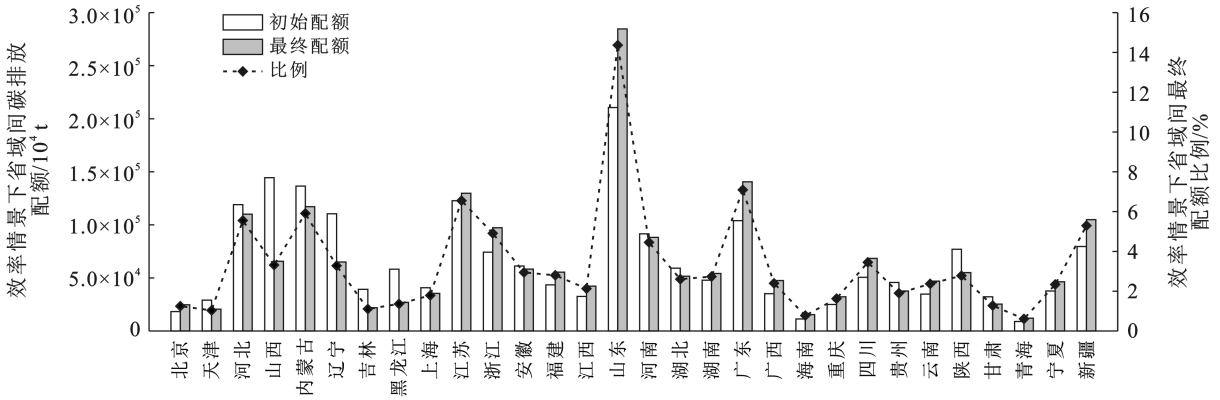

图 3　效率情景下省域间碳排放配额分配结果及比例

Fig.3　Allocation results and proportion of inter-provincial carbon emission quotas under efficiency scenario

2.3　生态情景下碳排放配额分配结果

(1) 相关指标及权重核算。生态情景下各指标权重结果如表 3 所示。

表 3　生态情景下各指标权重

Table 3　Weight of each index under ecological scenario

	指 标	权 重
减排责任	人均累计碳排放量	0.082
平等主义	人口	0.120
	GDP	0.142
减排能力	平均碳排放强度	0.069
	平均能源强度	0.078
减排潜力	第二产业比例	0.096
对碳排放中和能力	森林生态系统碳汇量	0.247
	农田生态系统碳汇量	0.165

(2) 碳排配额分配结果。生态情景下初始碳排放配额分配结果见图 4。碳排放配额前 5 省份为四川(1.11×10^9 t,5.61%)、广东(9.91×10^8 t,5.00%)、河南(9.68×10^8 t,4.88%)、云南(9.49×10^8 t,4.79%)、黑龙江(9.35×10^8 t,4.71%),这些地区森林、农田碳汇量处于全国中上等水平,具有较强的碳排放承载能力,与生态情境下森林、农田碳汇量这两个高权重指标契合。碳排放配额后 5 省份为宁夏(1.59×10^8 t,0.80%)、青海(3.21×10^8 t,1.62%)、海南(3.61×10^8 t,1.82%)、山西(3.66×10^8 t,1.84%)、天津(4.15×10^8 t,2.09%),这些地区共同特征为森林、农田碳汇量较低,且人口基数较小,GDP 总量较低,因此导致碳配额较少。建议这些地区政府应落实好相关财政支持,根据自身环境状况开展“保绿扩绿”工作,宜林则林、宜草则草,保护强化本土自然生态系统,以“强碳汇”助力“双碳”目标的实现。

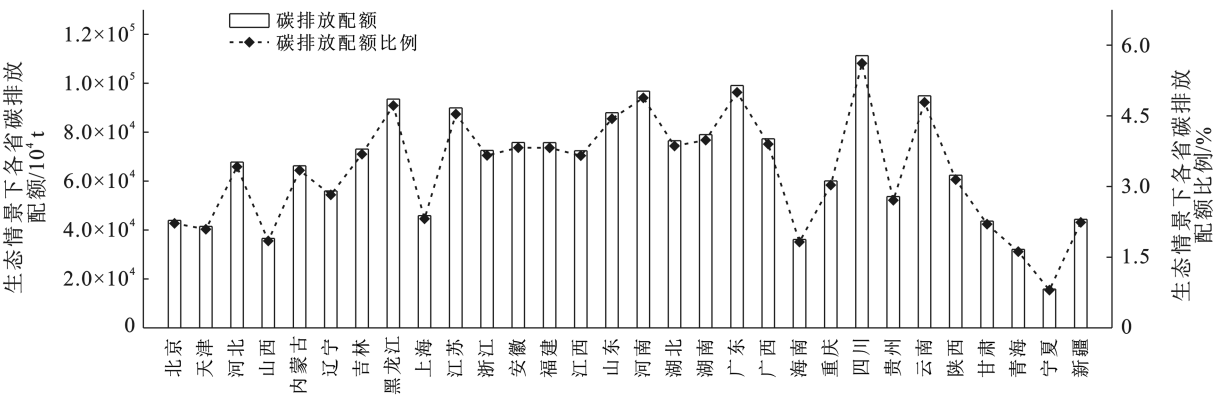

图 4　生态情景下省域间碳排放配额分配结果及比例

Fig.4　Distribution results and proportion of carbon emission quotas among provinces under ecological scenarios

2.4　兼顾公平—生态—效率情景下碳排放配额分配结果

如图 5 所示,碳排放配额前 5 省份为广东(1.45×10^9 t,7.30%)、江苏(1.31×10^9 t,6.63%)、山东(1.28×10^9 t,6.48%)、河南(1.05×10^9 t,5.32%)、浙江(9.23×10^8 t,4.66%),这些地区具有经济体量大,

人口基数高，森林/农田碳汇量较高的共有特征，因此在兼顾情下更具优势；但碳排放配额后 5 位的青海（2.32×10^8 t，1.17%）、宁夏（2.32×10^8 t，1.17%）、海南（2.69×10^8 t，1.36%）、天津（3.03×10^8 t，1.53%）、吉林（3.40×10^8 t，1.72%）则由于较小经济体量，较少人口规模导致配额较低。

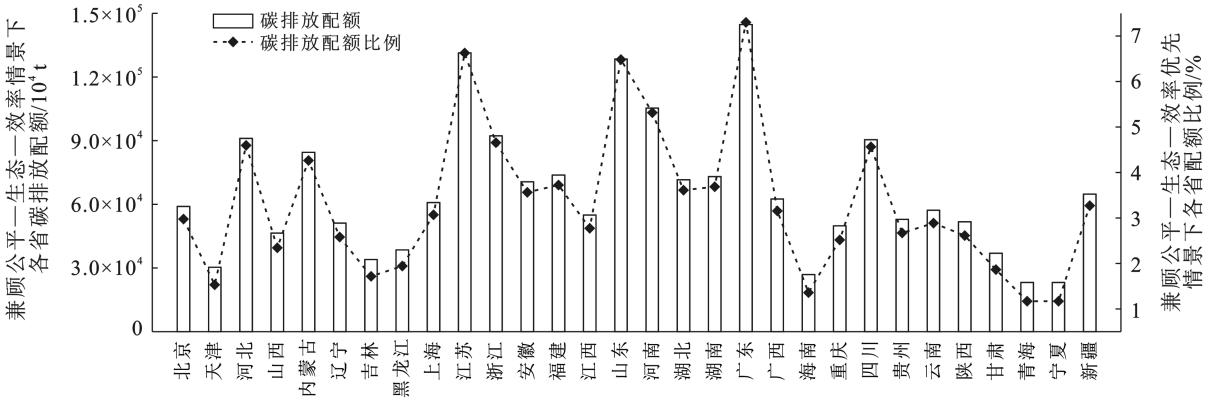

图 5 兼顾公平—生态—效率情景下省域间碳排放配额分配结果及比例

Fig.5 Allocation results and proportion of inter-provincial carbon emission quotas under scenario of fairness-ecology-efficiency

2.5 不同情景下区域碳边际减排成本对比

采用 SBM 对偶模型测算不同情景下碳边际减排成本结果见图 6。不同情景下，各省域碳边际减排成本差异较大。

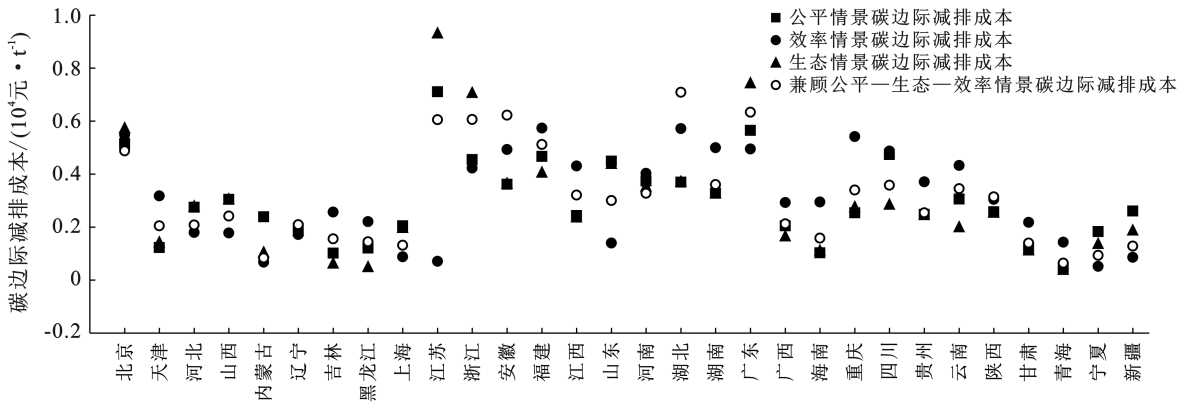

图 6 不同情景下碳边际减排成本比较

Fig.6 Comparison of marginal carbon emission reduction costs under different scenarios

统计分析各省份不同情景下碳边际减排成本为最低或次低的频次，最终发现生态情境下低碳边际减排成本省份比例高达 83.33%，说明此情景下大部分省份碳边际减排成本较低并存在明显优势。经核算在公平情景下平均碳边际减排成本为 2 950 元/t，效率情景下为 3 120 元/t，生态情景下为 2 910 元/t，兼顾公平—生态—效率情景下为 3 090 元/t，可见相较于其他分配指标，考虑森林、农田生态系统碳汇量的分配方案明显促进碳边际减排成本的降低，这与碳汇量增加可抵消减排难度较大、减排成本较高碳排放的观点相契合[37]。兼顾公平—生态—效率情景下碳边际减排成本明显上升，高于公平情景和生态情景，验证了碳排放效率的提升同时也增加了碳边际减排成本，这与肖玉仙等[38]的研究结果一致。因此，认为生态情景分配方案是在碳边际减排成本最低的条件下实现“双碳”目标的最优方案。

3 结 论

（1）4 种情景下分配结果各有侧重，公平情景下碳排放配额偏向于人口基数大，GDP 总量较高，第二产业比例较高的区域广东、江苏、山东；效率情景下偏向于能源供应端河北、内蒙古，及经济发展水平高，整体经济体量大的山东、广东；生态情景下偏向于森林、农田碳汇量处于全国中上等水平，对碳排放有较强中

和能力的四川、广东、河南;兼顾公平—生态—效率情景下偏向于经济体量大,人口基数高,森林/农田碳汇量较高的区域。

(2) 比较 4 种情景下不同省份的碳排放配额排名变化情况,虽整体存在明显差异,但依然发现广东、江苏、山东、河南省在不同情景下全国碳排放配额排名中均较为靠前(基本为前 5 位),可能是由于经济体量及人口规模较大、生态系统碳汇能力较强的共有特征所致,这几个省份也将是未来碳排放配额交易的最主要参与者。未来如何进一步提升能源效率、实现低排放高质量经济发展、激发强化生态系统碳汇能力也将是其共同的发展方向。

(3) 对于省域间碳边际减排成本核算结果,在公平、效率、生态、兼顾公平—生态—效率情景下平均碳边际减排成本分别为 2 950 元/t,3 120 元/t,2 910 元/t,3 090 元/t,可以发现相较于其他情景,引入碳汇指标后的生态情景,促使减排成本进一步降低,碳汇能力可抵消减排难度较大,成本较高的碳排放;兼顾情景下减排成本明显高于公平情景和生态情景,碳排放效率的提升同时也增加了碳边际减排成本。最终,确认生态情景下的分配方案可在碳边际减排成本最低的条件下实现“双碳”目标。

[参 考 文 献]

[1] 李治国,杨雅涵,赵园春.地方政府竞争促进了地区碳排放强度吗? [J].经济与管理评论,2022,38(2):136-146.

[2] 高艳丽,董捷,李璐,等.碳排放权交易政策的有效性及作用机制研究:基于建设用地碳排放强度省际差异视角[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):783-793.

[3] 戚永颖.碳中和愿景下的能源绿色转型发展:访中国海油集团能源经济研究院院长王震[J].国际石油经济,2021,29(10):1-6.

[4] 李泽坤,任丽燕,马仁锋,等.基于效率视角的浙江省2030 年碳排放配额分析[J].生态科学,2020,39(3):201-211.

[5] 宋杰鲲,张凯新,曹子建.省域碳排放配额分配:融合公平和效率的研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):7-13.

[6] 王勇,程瑜,杨光春,等.2020 和 2030 年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解[J].中国环境科学,2018,38(8):3180-3188.

[7] Yang Yuan, Cai Wenjia, Wang Can, et al. Regional allocation of CO_2 intensity reduction targets based on cluster analysis [J]. Advances in Climate Change Research, 2012,3(4):220-228.

[8] Chang Liyue, Hao Xuguang, Song Mei, et al. Carbon emission performance and quota allocation in the Bohai Rim Economic Circle [J]. Journal of Cleaner Production,2020,258:120722.

[9] Zhou Xing, Guan Xueling, Zhang Ming, et al. Allocation and simulation study of carbon emission quotas among China's Provinces in 2020 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(8):7088-7113.

[10] Chen Liyun, He Yuan, Li Guang, et al. Initial allocation model of CO_2 emission allowances based on the equity-efficiency tradeoff [J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2021,38(2):2050048.

[11] Cheng Yonglong, Gu Baihe, Tan Xianchun, et al. Allocation of provincial carbon emission allowances under China's 2030 carbon peak target: a dynamic multi-criteria decision analysis method [J]. Science of the Total Environment, 2022,837:155798.

[12] Kong Yingchao, Zhao Tao, Yuan Rong, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese Provinces based on equality and efficiency principles [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,211:222-232.

[13] 林枫,金刚.中国县域二氧化碳边际减排成本:基本事实、影响因素及区域差异分解[J].环境经济研究,2023,8(1):29-52.

[14] Choi Y, Zhang Ning, Zhou P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO_2 emissions in China: A slacks-based efficiency measure [J]. Applied Energy, 2012,98:198-208.

[15] Duan Fumei, Wang Yong, Wang Ying, et al. Estimation of marginal abatement costs of CO_2 in Chinese Provinces under 2020 carbon emission rights allocation: 2005—2020 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(24):24445-24468.

[16] 张涛.《2030 年前碳达峰行动方案》解读[J].生态经济,2022,38(1):9-12.

[17] 孔颖超.基于公平和效率原则的中国碳配额初始分配研究[D].天津:天津大学,2019.

[18] 周迪,郑楚鹏,华诗润,等.公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径[J].自然资源学报,2019,34(1):80-91.

[19] 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,2021,36(4):921-933.

[20] 黄奇.基于 WITCH 模型的区域碳排放权分配与排放路径研究[D].黑龙江 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.

[21] 丁仲礼,段晓男,葛全胜,等.2050 年大气 CO_2 浓度控制:各国排放权计算[J].中国科学(D 辑:地球科学),2009,39(8):1009-1027.

[22] 周小惠.碳交易市场背景下区域碳排放权配额动态分配机制及方法研究[D].四川 成都:西华大学,2022.

[23] 武振华.我国化工行业碳排放效率、影响因素及碳配额分配研究[D].天津:天津大学,2018.

[24] 蒋惠琴.碳排放权初始配额分配研究[D].浙江 杭州:浙

江工业大学,2019.

[25] 邢佳琛.基于零和收益 DEA 模型的中国 2030 年碳排放目标省际分配研究[D].天津:天津大学,2019.

[26] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978,2(6):429-444.

[27] 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.

[28] Lins M P E, Gomes E G, Soares de Mello J C C B, et al. Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model [J]. European Journal of Operational Research, 2003,148(2):312-322.

[29] Gomes E G, Lins M E. Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models [J]. Journal of the Operational Research Society, 2008,59(5):616-623.

[30] 崔晓燕.中国省际电力部门碳排放配额分配:基于熵法和零和 DEA 模型[D].天津:天津大学,2020.

[31] Cecchini L, Venanzi S, Pierri A, et al. Environmental efficiency analysis and estimation of CO_2 abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): a SBM-DEA model with undesirable output [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,197:895-907.

[32] 赵敏.中国碳排放效率及边际减排成本研究[D].甘肃兰州:兰州财经大学,2022.

[33] 王文举,陈真玲.中国省级区域初始碳配额分配方案研究:基于责任与目标、公平与效率的视角[J].管理世界,2019,35(3):81-98.

[34] 张凯新.我国省域碳排放权配额分配研究[D].山东 东营:中国石油大学(华东),2017.

[35] 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.

[36] 郭茹,吕爽,曹晓静,等.基于 ZSG-DEA 模型的中国六大行业碳减排分配效率研究[J].生态经济,2020,36(1):13-18.

[37] 高杨,姚雪,白永秀,等.有为“链长”赋能绿色低碳农业产业链:内在机理与实现路径[J].经济学家,2022(12):116-124.

[38] 肖玉仙,尹海涛.我国碳排放权交易试点的运行和效果分析[J].生态经济,2017,33(5):57-62.