

基于效率-公平原则的两阶段DEA网络模型铁路部门碳配额研究

赵锐, 蒋启帆, 熊欣, 唐玥, 祝仟

西南交通大学 环境科学与工程学院, 成都 611756

摘要: 挖掘铁路行业的碳市场潜力, 是提升管理效能, 落实双碳战略的重要途径。文章通过核算2017—2020年中国铁路部门碳排放, 基于效率-公平耦合原则, 构建了数据包络分析 (DEA) 网络模型驱动的铁路部门碳配额分配模型, 提出面向2030年碳达峰目标的碳配额分配方案。结果显示: (1) 2017—2020年铁路部门碳排放呈现先增加后降低趋势。其中, 2017—2020年, 碳排放先由 6083.60×10^4 t增至 6372.10×10^4 t, 增幅达4.74%; 后在2020年降至 5775.80×10^4 t。(2) 碳排放整体呈现由客货周转量较大地区向周转量小地区递减的趋势, 其中上海局碳排放贡献最大, 2017—2020年碳排放总量为 2218.68×10^4 t, 青藏铁路公司碳排放贡献最小, 2017—2020年碳排放总量为 1070.74×10^4 t。(3) 兼顾效率与公平原则下, 北京局、太原局、呼和浩特局及上海局分配的碳配额较多, 分别为 841.77×10^4 t、 630.40×10^4 t、 585.81×10^4 t和 510.52×10^4 t; 而青藏铁路公司、昆明局和哈尔滨局则分配的碳配额较少, 分别为 301.23×10^4 t、 295.54×10^4 t和 294.82×10^4 t。(4) 北京局、太原局、呼和浩特局及西安局等铁路局的碳配额大于其碳排放预测值, 其差值分别为 342.57×10^4 t、 280.69×10^4 t、 224.35×10^4 t及 132.84×10^4 t; 而上海局、武汉局、广州局及南昌局等铁路局的碳配额小于其碳排放预测值, 其差值分别为 -210.17×10^4 t、 -189.50×10^4 t、 -170.77×10^4 t和 -158.63×10^4 t。

关键词: 数据包络分析 (DEA); 碳排放; 碳配额; 铁路部门; 分配

An efficiency and equity principle based two-stage DEA network model driven carbon allowances for the national railroad sector

ZHAO Rui, JIANG Qifan, XIONG Xin, TANG Yue, ZHU Qian

School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Background, aim, and scope Leveraging the rail sector's carbon market potential is an important way to improve management efficiency and implement the "Carbon Peak and Carbon Neutrality" strategy. This study provides an efficiency and equity principle based two-stage of data envelopment analysis (DEA) network model driven carbon allowances for the national railroad sector, to propose an appropriate allocation scheme towards the 2030 carbon peak target. **Materials and methods** Based on the data from *China Statistical Yearbook* and *China*

收稿日期: 2023-10-12; 录用日期: 2024-02-16; 出版日期: 2024-02-28

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (N2021Z013); 四川省青年科技创新团队项目 (2022JDTD0005); 四川省重点研发计划项目 (2023YFG0111); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目 (2022-重大-02)

第一作者简介: 赵锐, 43岁, 教授/博士, 从事低碳可持续设计与技术研究, E-mail: ruizhao@swjtu.edu.cn

引用格式: 赵锐, 蒋启帆, 熊欣, 等. 2026. 基于效率-公平原则的两阶段DEA网络模型铁路部门碳配额研究 [J]. 地球环境学报, 17(1): 165–176. <https://cstr.cn/32259.14.JEE242018>.

Citation: Zhao R, Jiang Q F, Xiong X, et al. 2026. An efficiency and equity principle based two-stage DEA network model driven carbon allowances for the national railroad sector [J]. *Journal of Earth Environment*, 17(1): 165–176. <https://cstr.cn/32259.14.JEE242018>.

Energy Statistical Yearbook during the period of 2018—2021, this study reveals the structure and spatio-temporal distribution characteristics of carbon emissions regarding China's railway sector from 2017 to 2020. A dynamic two-stage carbon allowance allocation model is constructed to obtain the carbon allowances for each sub-bureau of the railway sector. **Results** The results show that between 2017 and 2020, carbon emissions from the railway sector had a trend of increase and then a trend of decrease. Among them, from 2017 to 2019, carbon emissions increased from 6083.60×10^4 t to 6372.10×10^4 t, an increase of 4.74%, and then decreased to 5775.80×10^4 t in 2020. The carbon emissions show a decreasing trend from regions with high passenger and freight volumes to regions with low volumes. The Shanghai Bureau contributed the largest carbon emissions, with a total carbon emission of 2218.68×10^4 t from 2017 to 2020, and the Qinghai-Xizang Bureau contributed the least carbon emissions, with a total carbon emission of 1070.74×10^4 t from 2017 to 2020. Beijing Bureau, Taiyuan Bureau, Hohhot Bureau and Shanghai Bureau received the largest proportion of the carbon allowances, with 841.77×10^4 t, 630.40×10^4 t, 585.81×10^4 t and 510.52×10^4 t, respectively. However, Qinghai-Xizang Bureau, Kunming Bureau, and Harbin Bureau received the least carbon allowances, with only 301.23×10^4 t, 295.54×10^4 t and 294.82×10^4 t, respectively. **Discussion** This study employs a two-stage allocation model that integrates the principles of fairness and efficiency, to reduce the carbon allowances for railway bureaus such as Shanghai Bureau and Guangzhou Bureau, which are located in economically developed regions and characterized by heavy tasks regarding passenger and freight transportation. Conversely, it increases the carbon allowances for railway bureaus such as Lanzhou Bureau and Qinghai-Xizang Bureau, which exhibit lower transportation turnover and smaller regional population density. This approach not only narrows the disparity in the allocation results but also facilitates emissions reduction among railway bureaus. Besides, the approach can better reveal the process relationship between the entire production process and its sub-stages. It also addresses the limitations of static allocation, where interactions among indicators can complicate optimal outcomes, ensuring that each railway bureau achieves the most efficient allocation. **Conclusions** Carbon emissions and carbon allowances exhibit a spatial decline, gradually decreasing from the eastern region to the western region and transitioning from resource-intensive areas to resource-poor areas. **Recommendations and perspectives** In the future, railway bureaus can develop targeted emissions reduction strategies based on the allocation of allowances. Combined with the allocation results, it is further expected to facilitate the design of the carbon pricing mechanism for railway bureaus, to promote the sector emissions reduction.

Key words: data envelopment analysis (DEA); carbon emission; carbon allowance; railway sector; allocation

铁路运输行业是交通运输碳排放的重要来源之一，随着路网规模不断扩大，铁路部门承担的运输任务会进一步增加，面临巨大的碳减排压力 (Lin 等, 2017; 王晓娟等, 2019)。双碳目标的提出，对铁路运输行业的低碳转型提出了新要求。在加大技术更新改善牵引和非牵引用能结构的同时，挖掘铁路行业的碳市场潜力，也是落实双碳目标的重要举措 (刘亚莉等, 2023)。

碳配额分配是碳市场运行的前提，即在明确碳排放总量前提下，将减排目标以配额形式分配至具有减排义务的利益主体，对市场活跃程度、交易价格等具有至关重要的调控作用 (Shi 等, 2022)。2021年7月，全国碳市场正式启动，年覆盖碳排放量约 45×10^8 t，成为全球覆盖温室气体排

放量最大的碳市场 (刘华军和张一辰, 2023)。因各行业碳排放配额核算方式不同，目前仅有电力行业被纳入首批碳交易市场 (孙晶琪等, 2025)。以发电行业碳市场稳定运行为基础，钢铁、化工、水泥等高耗能、高排放行业被纳入碳市场的进程也在逐步加快 (曹桐等, 2022)。排放贡献决定行业是否会被碳交易体系所覆盖，而碳配额分配的合理性又将进一步决定碳交易市场的规模 and 未来发展空间。对于铁路部门而言，由于其公益性和服务性的特点，碳排放在未来一段时期内还会持续增长 (Zuo 等, 2023)。研究铁路部门的碳配额分配方案对实践双碳战略具有重要的现实意义。

碳配额的分配形式及方法具有多样性，主要分为指标法与优化法。就指标法而言，往往将碳

配额视为一个整体,基于单一指标或多指标开展分配(Zhou和Wang,2016;李堃和王奇,2019)。单指标往往选择人口、GDP、能源消费、人均碳排放等,着重体现公平或效率的单一原则(于潇和孙猛,2015;Hu等,2017;刘海英和郭文琪,2022);而多指标则考虑构建均衡公平和效率的多层指标体系,以多属性决策确定分配权重(Zhao等,2017;王勇等,2018;方恺等,2020)。指标法目前多应用于国家/区域尺度的碳配额分配,以明确各主体应承担的减排义务(张博和何明洋,2015;Cai和Ye,2019;王文举和孔晓旭,2022)。但该方法未考虑各指标潜在的交互与耦合关系,如人口、人均GDP和人均历史累计碳排放等指标可能相互关联,易引发多重共线性,对分配结果产生影响(万晓乐等,2022)。另一种是以数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)效率测度为代表的优化法,常见的包括ZSG-DEA、SBM超效率模型等(谭显春等,2023)。前者主要基于零和博弈及比例消减策略的思想,在固定总量条件下实现资源配置效率最大(Gomes和Lins,2008;郑立群,2012);后者着重突出生产过程中非期望产出因素的影响,通过引入松弛变量实现各决策单元的有效排序(Tone,2001)。但优化法的本质还是保证分配结果的效率最大化,可能忽视分配的公平性,易导致分配结果的极差过大,降低分配结果的合理性。

为此,相关研究将指标法与优化法组合,形成碳配额分配的混合模型,兼顾效率与公平原则,保障减排主体的投入产出效益达到最优(Cheng等,2022;Zhao等,2023)。例如:将指标法作为约束,驱动以ZSG-DEA为主体的分配优化(Kong等,2019;Yang等,2020);利用指标法获取初始分配方案再结合优化法开展二次优化(苗壮等,2013)。组合法因具有较强的自主性,在碳配额研究中还有较大的探索空间(谭显春等,2023)。但目前混合分配方法应用于铁路行业的碳配额分配还鲜有报道。

铁路部门实行“国铁集团-铁路局-站段”三级管理模式。其中,国铁集团主要负责铁路运输的统一调度指挥,下属的18个铁路局依据各自管辖范围从事客货运输主营业务,如上海局和广州局以客运为主,太原局和成都局以货运为主;站段是铁路运输生产的基础单元,包括机务段、工务

段、车站等,且各站段的功能和属性不同(任南琪等,2022)。尽管各铁路局的管辖范围不一,本研究仍将其视为同类型的决策单元,因其从事的主营业务类似,具有相似的实体属性(李夏苗等,2019)。由于各铁路局营业里程、客货周转量、能源结构等不同,碳排放存有差异,通过引入DEA网络模型在兼顾效率和公平的原则下开展碳配额分配,可明确各个路局的减排义务,实现有差别的减排责任划分。

本研究以指标法为基础构建了耦合效率与公平原则的DEA网络模型,与ZSG-DEA模型串联,构成了“约束-优化”的动态两阶段DEA碳配额分配模型。以网络模型作为分配的约束条件,通过ZSG-DEA开展优化分配,可以在一定程度上克服单一效率原则下分配结果极差过大的问题,以保证分配结果兼顾效率和公平。在此基础上,还分析了各阶段效率值及分配结果,提出铁路部门面向2030年碳达峰目标的减排建议,为推动铁路部门低碳转型提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 铁路部门碳排放核算

本研究的碳排放核算边界是指某一运营时期内(通常为1a)由内燃机车、电力机车和动车组运营系统以及为机车运营提供辅助服务产生的碳排放,碳排放总量为直接碳排放与间接碳排放之和(任南琪等,2022):

$$E_t = E_d + E_i \quad (1)$$

式(1)中, E_t 为碳排放总量, E_d 为直接碳排放, E_i 为间接碳排放;它们均以 CO_2 计,单位为t。

直接碳排放主要包括内燃机车和运营过程中锅炉等消耗燃油和燃煤所产生的碳排放(韩佳晖等,2019):

$$E_d = \sum_{i=1}^I R_{Li} \times R_{zi} \times C_i \times \partial_i \times \rho \quad (2)$$

式(2)中, R_{Li} 为第*i*种化石燃料的消费量,固体/液体燃料单位为t,气体燃料单位为 Nm^3 ; R_{zi} 为第*i*种化石燃料的平均低位热值,其中,固体/液体燃料单位为 GJ/t ,气体燃料单位为 GJ/Nm^3 ; C_i 为燃料*i*的单位热值含碳量,单位为 t/GJ ; ∂_i 为燃料*i*的碳氧化率; ρ 为 CO_2 与C的分子量比($44/12=3.67$)。

间接碳排放包括系统净购入使用电力、车站用电设备所消耗电力、铁路运输维修过程中所消

耗电力、热力消费排放和其他运营活动产生的排放等, 测算如下 (韩佳晖等, 2019):

$$E_i = E_e + E_h \quad (3)$$

$$E_e = A_{De} \times E_{Fe} \quad (4)$$

$$E_h = A_{Dh} \times E_{Fh} \quad (5)$$

式(3)—(5)中, E_e 为铁路运营过程净购入使用电力产生的排放 (以 CO_2 计), 单位为 t ; E_h 为铁路运营过程净购入使用热力产生的排放 (以 CO_2 计), 单位为 t ; A_{De} 为铁路部门净购入使用电量, 单位为 kWh ; E_{Fe} 为区域电网年平均供电排放因子 (以 CO_2 计), 单位为 t/kWh ; A_{Dh} 为铁路部门净购入热力量, 单位为 GJ ; E_{Fh} 为外购热力的碳排放因子 (以 CO_2 计), 单位为 t/GJ 。

1.2 铁路部门碳配额总量测算

本研究拟将铁路部门2030年的碳排放预测量作为待分配的碳配额总量。国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》指出, 我国到2030年承诺碳排放强度较2005年降低65% (中华人民共和国国务院, 2021-10-26)。为此, 本研究也设定2030年铁路部门碳排放强度较2005年降低65%。现阶段我国铁路运输碳排放核算主要依据周转量算法, 主要原因在于铁路运输碳排放主要由能源消耗产生, 而能耗又与运输量及运输里程直接相关 (田佩宁等, 2023)。铁路部门的碳排放强度主要指单位客货周转量所产生的碳排放, 用于衡量运输周转量与碳排放的关联关系 (王靖添和马晓明, 2021)。

为保证后续建模的一致性, 统一采用客货周转量开展铁路部门面向2030年的碳排放预测。同时为减小新冠病毒传播影响的不确定性, 着重选取2016—2019年各铁路局的客货周转量数据, 结合灰色预测模型GM(1, 1)对2030年各铁路局的客货周转量进行预测 (谢乃明和刘思峰, 2005):

设定2016—2019年铁路局的客货周转量原始数据的序列为:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (6)$$

一次累加生成序列为:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (7)$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为:

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad (9)$$

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], k = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

则GM(1, 1)模型的基本形式为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式(11)中, a 称为发展系数, b 为灰色作用量。

对 $X^{(1)}$ 建立一阶线性微分方程模型:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (12)$$

求解上述微分方程, 得到各铁路局客货周转量的灰色预测模型GM(1, 1)为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left\{ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right\} e^{-ak} + \frac{b}{a}, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13)$$

在各铁路局客货周转量预测的基础上, 结合2030年我国铁路部门碳排放强度的设定, 预测2030年铁路部门碳排放量 (王靖添和马晓明, 2021; 中华人民共和国国务院, 2021-10-26):

$$I_{2005} = \frac{C_{2005}}{G_{2005}} \quad (14)$$

$$I_{2030} = I_{2005} \times (1 - 65\%) \quad (15)$$

$$C_{i2030} = I_{2030} \times G_{i2030} \quad (16)$$

$$C_{2030} = \sum_{i=1}^n C_{i2030} \quad (17)$$

式(14)—(17)中, I_{2005} 与 I_{2030} 分别表示2005年和2030年的铁路部门碳排放强度 (以 CO_2 计), 单位为 t/km ; C_{2005} 与 C_{2030} 分别表示2005和2030年铁路部门碳排放 (以 CO_2 计), 单位为 t ; G_{2005} 表示2005年铁路部门总客货周转量, 单位为 t/km ; G_{i2030} 表示2030年第 i 个铁路局的客货周转量, 单位为 t/km ; C_{i2030} 表示2030年第 i 个铁路局的碳排放 (以 CO_2 计), 单位为 t 。将各铁路局汇总的2030年铁路部门碳排放预测量 C_{2030} 作为后续待分配的配额总量。

1.3 耦合效率与公平原则的两阶段碳配额分配模型

图1为耦合效率-公平原则的约束-优化两阶段碳配额分配模型。其中, 第一阶段建立DEA网络模型耦合公平和效率原则对分配进行约束。效率原则关注投入产出视角下的碳排放效率问题, 即碳排放效率越高的铁路局获得尽可能多的碳配额, 而公平原则中则关注铁路部门各铁路局获得配额的公平性; 第二阶段作为优化阶段, 通过ZSG-DEA模型的多次迭代优化对碳配额总量进行分配, 保证各铁路局的ZSG-DEA效率水平处于有效前沿。

为保持模型的一致性, 选取各铁路局的营业

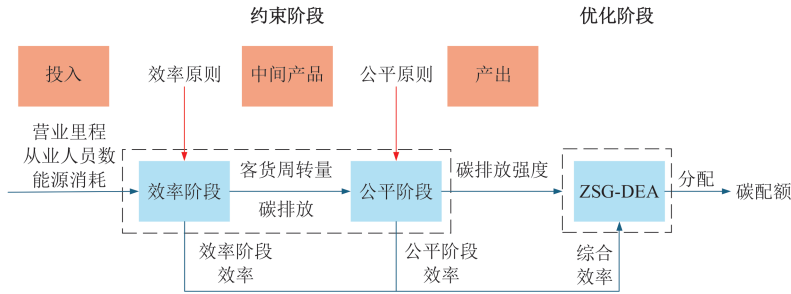


图 1 约束-优化两阶段碳配额分配模型

Fig. 1 The two-stage dynamic model for carbon allowances allocation

里程、从业人员数、能源消耗、客货周转量、碳排放以及碳排放强度作为两阶段碳配额分配模型的分配指标, 以 2017—2020 年 4 a 的平均加权数据作为指标数据, 数据来源见表 1。在 DEA 网络模型中, 效率阶段将各铁路局的营业里程、从业人员数和能源消耗作为模型投入, 客货周转量作为期望产出, 碳排放作为非期望产出, 旨在以更少的投入获得更多的客货周转量, 并产生尽可能少的碳排放; 公平阶段将效率原则下的全部产出作为投入, 并以碳排放强度作为产出, 旨在以碳排放强度作为约束, 尽可能减小各个铁路局分配结果的极差。

表 1 各分配指标数据来源

Tab. 1 Data sources of allocation indicator

分配指标	数据来源
营业里程	《中国统计年鉴: 2018—2021》
从业人员数	(国家统计局, 2018, 2019, 2020, 2021)
客货周转量	
能源消耗	《中国能源统计年鉴: 2018—2021》 (国家统计局能源统计司, 2019, 2020, 2021, 2022)
碳排放	由能源消耗量与碳排放因子换算
碳排放强度	由碳排放与客货周转量换算

基于上述思想, 构建约束阶段如下 (Jin 等, 2019, 方恺等, 2020):

$$E_k^1 = \max \left(\frac{\sum_{p=1}^q w_p Z_{pk}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{ik}} \right) \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_{p=1}^q w_p Z_{pj} / \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$$

$$w_p, v_i \geq 0, p = 1, \dots, q, i = 1, 2, \dots, m$$

$$E_k^2 = \max \left(\frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_{rk}}{\sum_{p=1}^q w_p Z_{pk}} \right) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} / \sum_{p=1}^q w_p Z_{pj} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_r, w_p \geq 0, r = 1, \dots, s, p = 1, \dots, q$$

$$E_k = \sum_{r=1}^s u_r^* Y_{rk} / \sum_{i=1}^m v_i^* X_{ik} \leq 1 \quad (20)$$

$$E_k^1 = \sum_{p=1}^q w_p^* Z_{pk} / \sum_{i=1}^m v_i^* X_{ik} \leq 1$$

$$E_k^2 = \sum_{r=1}^s u_r^* Y_{rk} / \sum_{p=1}^q w_p^* Z_{pk} \leq 1$$

$$E_k = E_k^1 \times E_k^2 \quad (21)$$

式(18)—(21)中, E_k 为第 k 个铁路局的综合效率值; E_k^1 为第 k 个铁路局在效率阶段的碳排放效率值; E_k^2 为第 k 个铁路局在公平阶段的碳排放效率值; X_{ij} 、 Z_{pj} 、 Y_{rj} 分别为第 j 个铁路局的第 i 个投入变量、第 p 个中间变量、第 r 个产出变量; v_i 、 w_p 、 u_r 分别为第 j 个铁路局的第 i 个投入变量权重系数、第 p 个中间变量权重系数、第 r 个产出变量权重系数; X_{ik} 、 Z_{pk} 、 Y_{rk} 分别第 k 个铁路局的第 i 个投入变量、第 p 个中间变量、第 r 个产出变量; v_i^* 、 w_p^* 、 u_r^* 分别为第 k 个铁路局的第 i 个投入变量权重系数、第 p 个中间变量权重系数、第 r 个产出变量权重系数。

在优化阶段中, 基于 DEA 网络模型各铁路局的综合效率推算出各自获得的碳配额:

$$C_{k3} = \frac{C_k \times E_k}{\sum_{k=1}^{18} C_k \times E_k} \times C_{2030} \quad (22)$$

式(22)中, C_{k3} 为第一阶段各铁路局获得的碳配额量, 单位为 10^4 t ; E_k 为各铁路局的碳排放综合效率, 无量纲; C_k 为各铁路局的碳排放量, 单位为 10^4 t ; C_{2030} 为铁路部门 2030 年的碳排放预测量, 单位为 10^4 t 。

随后引入 ZSG-DEA 模型, 通过减少低效率铁路局的碳配额, 多次迭代, 直到各铁路局的效率值都达到有效前沿面, 得出经优化后的碳配额

分配结果 (Yang 等, 2020)。若某个铁路局 (DMU₀) 为非 DEA 有效的决策单元, 其 ZSG-DEA 效率值为 φ_0 。为实现 DEA 有效, 必须减少对投入 k 的使用, 减少量为 $u_0 = x_{0k}(1 - \varphi_0)$, 并将其按比例分配给其他铁路局, 则其他铁路局 (DMU_{*i*}) 从该铁路局 (DMU₀) 处得到的 k 分配值为:

$$x_{0k}^* = \frac{x_{ik}}{\sum_{i \neq 0} x_{ik}} x_{0k} (1 - \varphi_0) \quad (23)$$

式(23)中, x_{0k}^* 是待评估铁路局比例消减前的第 k 个投入要素; x_{ik} 是第 i 个铁路局的第 k 个投入变量; x_{0k} 是待评估铁路局的第 k 个投入要素; φ_0 是碳配额总量固定下某个铁路局 (DMU₀) 的相对效率。

由于所有铁路局都在同时进行投入的比例消减, 经调整结束后, 投入 k 对其他铁路局分得的碳配额为:

$$x'_{ik} = \sum_{i \neq 0} \left[\frac{x_{ik}}{\sum_{i \neq 0} x_{ik}} x_{0k} (1 - \varphi_0) \right] - x_{ik} (1 - \varphi_0) \quad (24)$$

式(24)中, x'_{ik} 为第 i 个铁路局经调整后的第 k 个投入变量。

铁路部门一共有 18 个铁路局作为决策单元, 每个铁路局都有 R 个投入指标和 M 个产出指标, 构建 ZSG-DEA 模型如下:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min \varphi_0 \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i y_{ij} \geq y_{0j}, j = 1, 2, 3, \dots, M \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} \left[1 + \frac{x_{0k}(1 - \varphi_0)}{\sum_{i \neq 0} x_{ik}} \right] \leq \varphi_0 x_{0k}, \\ k = 1, 2, 3, \dots, R \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, i = 1, 2, 3, \dots, 18 \\ \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, 18 \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中, λ_i 为相对于 DMU₀ 重新构造一个 DMU 有效组合中某个铁路局 (DMU_{*i*}) 的比例; x_{ij} 为第 i 个铁路局的第 j 个投入; y_{ij} 为第 i 个铁路局的第 j 个产出; y_{0j} 为待评估的铁路局的第 j 个产出要素。

2 结果与分析

2.1 铁路部门碳排放

如图 2 所示, 2017—2020 年铁路部门碳排放呈现先增加后降低趋势。期间碳排放总量先持续增

长, 由 6083.60×10^4 t 增至 6372.10×10^4 t, 增长近 4.74%; 相较 2019 年, 2020 年碳排放降至 5775.80×10^4 t, 这可能是受新冠病毒传播影响, 物流和人员流动有一定程度下降。Guo 等 (2022) 对铁路部门 2006—2018 年的碳排放开展过核算, 但结果整体偏小, 2017 年和 2018 年的碳排放分别仅为 3000.00×10^4 t 和 3200.00×10^4 t, 与本研究结果相差较大。原因可能在于其仅考虑了外购电力用于机车牵引所产生的碳排放, 非牵引用途消耗的煤、汽油、天然气等能源消耗产生的碳排放未纳入测算边界。

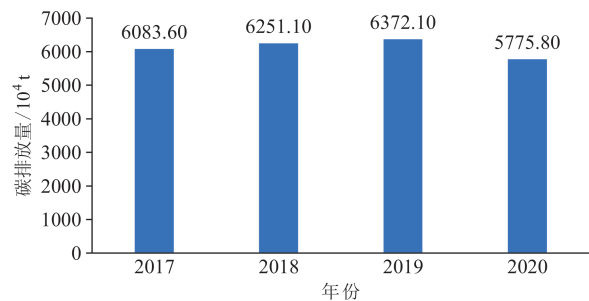


图 2 2017—2020 年铁路部门碳排放变化

Fig. 2 Changes in carbon emissions of railway sector from 2017 to 2020

2017—2020 年各铁路局的碳排放变化如图 3 所示, 整体呈现较强的空间异质性, 由人口密集、区域经济较发达、客货周转量较大地区向人口密度低、区域经济欠发达、客货周转量较小地区递减 (陈锋等, 2022)。其中, 碳排放贡献最高的是上海局, 排放量为 2218.68×10^4 t, 占 4 a 碳排放总量的 9.06%; 广州局碳排放次之, 排放量为 1895.10×10^4 t, 占 4 a 碳排放总量的 7.74%。成都局和北京局的碳排放贡献位列第三和第四, 碳排放分别为 1551.80×10^4 t 和 1466.80×10^4 t, 占 4 a 碳排放总量的 6.34% 和 5.99%。而碳排放贡献最少的是青藏铁路公司, 仅有 1070.74×10^4 t, 占 4 a 碳排放总量的 4.37%。

2.2 铁路部门 2030 年碳配额总量

2030 年铁路部门碳排放将达到 7900.70×10^4 t, 较 2020 年碳排放增加 36.79%, 后续以其作为铁路部门 2030 年的碳配额总量, 开展各铁路局的碳配额分配。图 4 显示碳排放的未来变化趋势也将整体呈现由客货周转量大的地区向周转量小地区递减趋势。其中, 碳排放排名前 3 位的铁路局仍然为上海局、广州局和成都局, 贡献分别为 720.70×10^4 t、

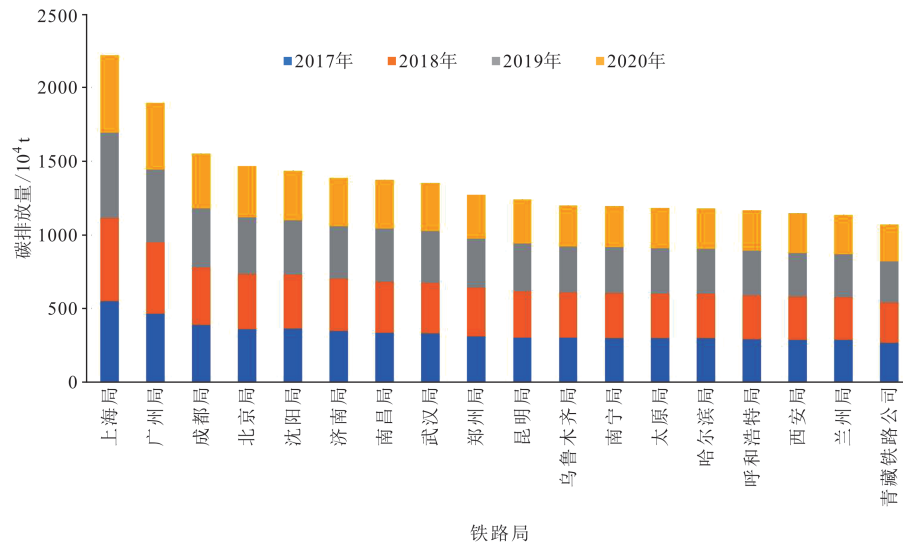


图3 2017—2020年各铁路局的碳排放变化

Fig. 3 Changes in carbon emissions of each railway bureau from 2017 to 2020

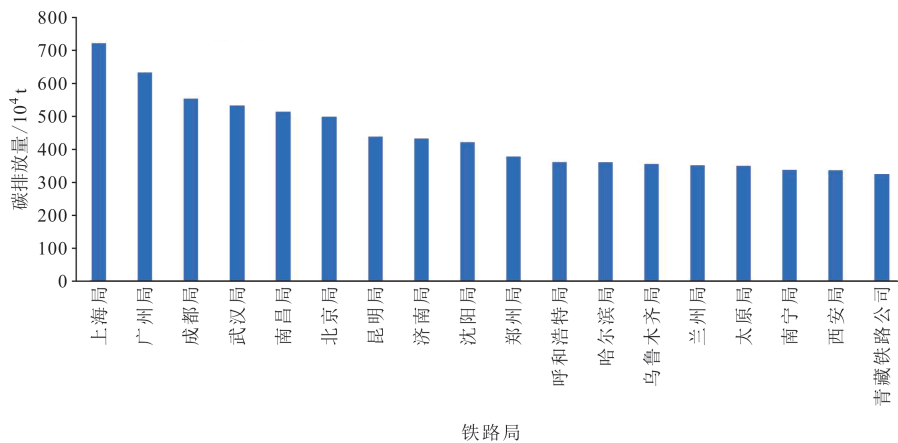


图4 2030年各铁路局碳排放预测结果

Fig. 4 Prediction results of carbon emissions of each railway bureau in 2030

632.35 $\times 10^4$ t和553.12 $\times 10^4$ t。各铁路局碳排放主要与其承担的运输活动相关(刘皓, 2023),上海局和广州局所辖范围分别是长三角和珠三角地区,区域经济较发达、区位优势显著、人口密度高、铁路网络密集,承担有大量的客货运输任务,产生的能源消耗及碳排放较大(应慧刚, 2019)。成都局所辖的川-渝-贵地区是长江经济带战略发展的重要纽带,承接了大量石油、化肥、钢铁等大宗货物的运输(孟昕馨和帅娟, 2019; 叶伟勤, 2022)。武汉局碳排放增速明显,2030年将达到532.79 $\times 10^4$ t,较2020年增长近55.53%。武汉局所辖范围处于我国华中腹地,具有重要的战略地位,是长江经济带战略链接点和国际国内双循环的枢纽中心(王军丽等, 2023),受政策驱动,未来会

吸纳更多的要素注入,客货运输任务更显繁重,碳排放随之加剧。碳排放贡献最小的仍然是青藏铁路公司,2030年将增至325.67 $\times 10^4$ t,因所辖范围主要地处青海、西藏等西部地区,人口密度较低,所承担的客货运任务相对较少(Xu和Lin, 2016),较2020年碳排放变化不大。

2.3 耦合效率与公平原则的各铁路局效率

在DEA网络约束模型中,各铁路局各阶段的效率值如表2所示。在效率约束阶段,非期望产出指标碳排放对铁路局效率提升有一定抑制作用,集中体现在对各铁路局节能减排技术的影响上,如上海局、南昌局、北京局和武汉局等电气化改造强度高的地区有机会获得更多的碳配额(Li和Jian, 2022)。而在公平约束阶段中,以碳排放强

表 2 DEA 网络模型各阶段效率及综合效率

Tab. 2 Efficiency at each stage and total efficiency of DEA network model

铁路局	效率阶段效率	公平阶段效率	综合效率
北京局	0.9797	1.0000	0.9797
西安局	0.9406	0.9962	0.9370
郑州局	0.9984	0.9140	0.9126
太原局	0.9159	0.9926	0.9091
呼和浩特局	0.9084	1.0000	0.9084
兰州局	0.9077	1.0000	0.9077
乌鲁木齐局	0.9502	0.7912	0.7517
南昌局	1.0000	0.7199	0.7199
济南局	0.9316	0.7632	0.7110
青藏铁路公司	0.9437	0.7443	0.7023
南宁局	0.8912	0.7604	0.6776
成都局	0.9569	0.6908	0.6610
武汉局	0.9976	0.6088	0.6073
沈阳局	0.7962	0.7125	0.5673
昆明局	1.0000	0.5519	0.5519
广州局	0.9200	0.5583	0.5137
上海局	1.0000	0.4790	0.4790
哈尔滨局	0.7249	0.5880	0.4262

度（碳排放与客货运周转量的比值）作为产出指标，碳排放强度相对较低的铁路局，有机会获得更多的碳配额，北京局、呼和浩特局和兰州局具有更高的效率值。根据耦合效率与公平原则，北京局的综合效率最高，达到0.9797，哈尔滨局的综合效率最低，仅有0.4262。

2.4 铁路局 2030 年碳配额

基于两阶段 DEA 网络模型的碳配额分配结果如表 3 所示。其中，获得碳配额最大的是北京局（ 841.77×10^4 t），配额量占总配额的 10.65%。北京局的客货运输需求量大，其所辖的京津冀地区所承载的主要以煤炭、矿石制品等大宗货物为主且铁路电气化程度较高（马向海等，2021；田璞等，2025），综合效率最高。太原局和呼和浩特局次之，碳配额分别为 630.40×10^4 t 和 585.81×10^4 t。二者所辖的山西及内蒙古地区是国内重要的能源和战略资源基地。在双碳目标约束下，区域的煤炭资源开采及煤化工品的生产未来将呈现减量趋势，碳排放增长相对平缓（李明君等，2022）。上海局和广州局本身处在节能减排技术相对发达的地区，二者在效率原则下的效率值都较高，但因其属于碳排放和客货运周转量都较高的区域，兼顾公平原则后综合效率降低，导致碳配额有所下降。

表 3 铁路局碳配额分配结果与碳排放预测结果对比

Tab. 3 Comparison between carbon allowances and carbon emissions prediction

铁路局	碳配额/(10^4 t)	碳排放预测量/(10^4 t)	差值/(10^4 t)
北京局	841.77	499.21	342.57
太原局	630.40	349.72	280.69
呼和浩特局	585.81	361.46	224.35
西安局	469.25	336.41	132.84
郑州局	470.37	378.57	91.80
兰州局	388.61	351.36	37.25
沈阳局	448.52	421.09	27.43
南宁局	337.08	338.79	-1.71
济南局	418.70	433.00	-14.30
青藏铁路公司	301.23	325.67	-24.44
乌鲁木齐局	322.38	354.53	-32.15
哈尔滨局	294.82	361.05	-66.23
成都局	426.56	553.12	-126.56
昆明局	295.54	438.02	-142.48
南昌局	354.26	512.89	-158.63
广州局	461.57	632.35	-170.77
武汉局	343.29	532.79	-189.50
上海局	510.52	720.70	-210.17

在分配的基础上，通过将碳配额结果与各铁路局的碳排放预测结果进行对比，发现碳配额大于碳排放预测量的铁路局有北京局、太原局、呼和浩特局及西安局等，其差值分别为 342.57×10^4 t、 280.69×10^4 t、 224.35×10^4 t 及 132.84×10^4 t，表明上述铁路局碳配额还有一定盈余，未来可考虑在交易市场中作为卖方；而碳配额小于碳排放的铁路局为上海局、武汉局、广州局及南昌局，其差值分别是 -210.17×10^4 t、 -189.50×10^4 t、 -170.77×10^4 t 和 -158.63×10^4 t，表明其分得的碳配额不足以抵消自身产生的碳排放，未来可能需要购买多余配额。

3 讨论

由研究结果可知，若只注重效率原则，配额分配结果与碳排放预测结果的变化趋势相似，总体呈现经济较发达地区的铁路局配额分配较多，经济欠发达地区分配较少的趋势。这与前人研究结果一致，如戢晓峰等（2022）、Guo 等（2022）和 Bai 等（2023）都指出交通运输行业的碳排放配额具有东高西低特征，东部地区如广东、上海、山东等分配的配额较多，而西部地区，如青海、贵州、云南获得的配额较少。

但仅考虑效率原则，经济发达地区（如广东、

上海、山东)的铁路局往往承担更密集的客货运输任务,运输周转量、货物发送量等核心指标显著高于欠发达地区(如青海、贵州、云南),其碳排放总量基数大,因规模效应和技术积累,单位排放效率更高,故配额分配可能会倾向于经济和减排技术发达地区(Yu等,2019),另一方面,欠发达地区铁路局虽运输需求较低,但技术升级滞后,单位运输量的碳排放强度较高,若仅按效率分配,其实际可获得的配额反而因低效率被压缩,导致后者承担较大的减排压力,加剧发达地区与欠发达地区间的发展不平衡程度(Zhan,2022)。公平原则照顾了欠发达地区铁路局的运输需求,增加其碳排放分配量,在一定程度上减小了应承担的减排压力,有助于在整体上缩小发达地区与欠发达地区间的铁路运输能力差距。欠发达地区(如兰州局、青藏铁路公司)的运输需求具有特殊性:其一,其运输周转量虽低,但承担着保障区域基本民生的战略功能;其二,部分欠发达地区(如青海、西藏)生态环境脆弱,铁路运输作为低能耗、低污染的运输方式,其适度发展对维护区域生态平衡具有正向作用;其三,欠发达地区铁路局的技术升级需要时间与资源投入,短期内难以达到发达地区的高排放效率水平,若强制要求其对标发达地区碳排放效率,可能抑制其发展动力。

本研究通过效率与公平原则,在一定程度上减少了上海局、广州局等客货运输任务繁重、区域经济发达的铁路局的碳配额;增加了兰州局、青藏铁路公司等运输周转量较小、区域人口密度较低的铁路局的碳配额,减小了整体分配结果的极差,促进了铁路局间的协同减排。

4 结论与展望

在核算2017—2020年我国铁路部门碳排放基础上,构建效率-公平耦合原则下的约束-优化两阶段碳排放分配模型,提出铁路局2030年碳减排目标的行业碳排放分配方案,得出主要结论如下:

(1) 2017—2020年,铁路部门碳排放总体呈现先增加后降低趋势。2017—2019年,铁路部门碳排放总体增长4.74%,由 6083.60×10^4 t增至 6372.10×10^4 t;而2020年相较2019年下降了9.36%,降至 5775.80×10^4 t。

(2) 耦合效率与公平原则的碳配额结果显示,北京局、太原局、呼和浩特局及上海局等获得较多的碳配额,分别为 841.77×10^4 t、 630.40×10^4 t、 585.81×10^4 t及 510.52×10^4 t;而哈尔滨局等铁路局则获得较少的碳配额,碳配额结果为 294.82×10^4 t。

(3) 碳配额与碳排放预测值差异显著,北京局、太原局、呼和浩特局及西安局等铁路局的碳配额盈余,其差值分别为 342.57×10^4 t、 280.69×10^4 t、 224.35×10^4 t及 132.84×10^4 t,上述铁路局可在碳市场中作为卖方;而上海局、武汉局、广州局及南昌局等铁路局的碳配额不足,其差值分别为 -210.17×10^4 t、 -189.50×10^4 t、 -170.77×10^4 t和 -158.63×10^4 t,需通过碳市场买方交易抵消自身碳排放。

针对上述研究结果,提出以下建议:

(1) 各铁路局可以结合配额分配情况制定相应的减排措施。如云南、广西、青海、西藏等西部地区及东三省地区所在的铁路局,依托风能、太阳能等地理资源优势,加速新能源替代化石燃料,减少碳排放。

(2) 依据铁路部门的碳排放特点,发挥其管辖区域间的协同效应,建立区域协同减排机制,优化配额配置与资本、劳动力资源调配以推动各铁路局低碳发展。鼓励发达地区铁路局主动承担更多减排责任并帮扶压力较大地区,促进协同减排。

(3) 结合配额分配情况,可考虑推进铁路部门内部碳交易市场运行机制设计,重点完善碳定价机制,激发铁路部门的减排动力。此外,探索铁路运输节能减排项目核证方法学,为后续参与碳市场交易打下基础。此外,也存在一定不足:鉴于能源消耗及碳排放数据的可获性,本研究仅针对2017—2020年铁路部门碳排放开展分析,尚未考虑新冠病毒传播等因素对碳排放预测和碳配额产生的影响;此外,兼顾效率与公平原则的分配,虽整体缩小了分配极差,但分配的合理性还有待后续研究进一步验证。

参考文献

- 曹桐,邹敏,张强,等. 2022. 发电行业碳排放配额分配对我国煤化工行业的启示[J]. 煤化工, 50(6): 29-32. [Cao T, Zou M, Zhang Q, et al. 2022. Learnings of China's coal chemical industry from carbon emission quota allocation

- practice of power generation industry [J]. *Coal Chemical Industry*, 50(6): 29–32.]
- 陈锋, 张晶, 任娇, 等. 2022. 基于LMDI模型的黄河流域碳排放时空差异及影响因素研究 [J]. *地球环境学报*, 13(4): 418–427. [Chen F, Zhang J, Ren J, et al. 2022. Spatiotemporal variations and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River Basin based on LMDI model [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 418–427.]
- 方恺, 李帅, 叶瑞克, 等. 2020. 全球气候治理新进展: 区域碳排放权分配研究综述 [J]. *生态学报*, 40(1): 10–23. [Fang K, Li S, Ye R K, et al. 2020. New progress in global climate governance: a review on the allocation of regional carbon emission allowance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(1): 10–23.]
- 国家统计局. 2018. 中国统计年鉴: 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of China. 2018. *China statistical yearbook: 2018* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局. 2019. 中国统计年鉴: 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of China. 2019. *China statistical yearbook: 2019* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局. 2020. 中国统计年鉴: 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of China. 2020. *China statistical yearbook: 2020* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局. 2021. 中国统计年鉴: 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of China. 2021. *China statistical yearbook: 2021* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局能源统计司. 2019. 中国能源统计年鉴: 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. 2019. *China energy statistics yearbook: 2018* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局能源统计司. 2020. 中国能源统计年鉴: 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. 2020. *China energy statistics yearbook: 2019* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局能源统计司. 2021. 中国能源统计年鉴: 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. 2021. *China energy statistical yearbook: 2020* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 国家统计局能源统计司. 2022. 中国能源统计年鉴: 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. 2022. *China energy statistical yearbook: 2021* [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 韩佳晖, 曹孙喆, 王菲, 等. 2019. 发挥铁路货运低碳效应的思
考 [J]. *铁路节能环保与安全卫生*, 9(6): 22–25. [Han J H, Cao S Z, Wang F, et al. 2019. Thinking on exerting low carbon effect of railway freight transportation [J]. *Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health*, 9(6): 22–25.]
- 戢晓峰, 白淑敏, 陈方, 等. 2022. 效率视角下省域交通碳排放配额分配研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 36(4): 1–7. [Ji X F, Bai S M, Chen F, et al. 2022. Allocation of provincial transportation carbon emission quota from the perspective of efficiency [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 36(4): 1–7.]
- 李堃, 王奇. 2019. 基于文献计量方法的碳排放责任分配研究发展态势分析 [J]. *环境科学学报*, 39(7): 2410–2433. [Li K, Wang Q. 2019. The academic research tendency study of carbon emission responsibility allocation based on bibliometric method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 39(7): 2410–2433.]
- 李明君, 岳丹, 杨道源, 等. 2022. 内蒙古自治区交通运输领域碳达峰体制机制研究 [J]. *交通节能与环保*, 18(4): 13–17. [Li M J, Yue D, Yang D Y, et al. 2022. Research on the mechanism of carbon peak in the field of transportation in Inner Mongolia autonomous region [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 18(4): 13–17.]
- 李夏苗, 郭旺, 王丽珊, 等. 2019. 基于网络DEA的货车运用过程相对效果评价方法 [J]. *铁道科学与工程学报*, 16(8): 2107–2113. [Li X M, Guo W, Wang L S, et al. 2019. Evaluation method of relative effect of wagon utilization process based on network DEA [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 16(8): 2107–2113.]
- 刘海英, 郭文琪. 2022. 碳排放权交易政策试点与能源环境效率: 来自中国287个地级市的实证检验 [J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 42(5): 72–86. [Liu H Y, Guo W Q. 2022. Carbon emission trading policy pilot and energy-environmental efficiency: an empirical study of 287 prefecture-level cities in China [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 42(5): 72–86.]
- 刘皓. 2023. 国外典型国家铁路运输企业碳中和战略研究及启示 [J]. *铁道运输与经济*, 45(6): 145–152. [Liu H. 2023. Research on carbon neutrality strategies of railway transport enterprises in foreign typical countries and inspirations [J]. *Railway Transport and Economy*, 45(6): 145–152.]
- 刘华军, 张一辰. 2023. 新时代10年中国绿色金融发展之路: 历程回顾、成效评估与路径展望 [J]. *中国软科学*, (12): 16–27. [Liu H J, Zhang Y C. 2023. China's path to green finance development in the decade of the new era: process review, effectiveness evaluation and path outlook [J]. *China Soft Science*, (12): 16–27.]
- 刘亚莉, 郭晓, 戴文婷, 等. 2023. “碳中和”愿景下我国碳排放现状和减排路径 [J]. *地球环境学报*, 14(6): 683–700. [Liu Y L, Guo X, Dai W T, et al. 2023. Carbon emission status

- and mitigation path under the vision “carbon neutrality” in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(6): 683–700.]
- 马向海,康晓敏,刘冲. 2021. 京津冀地区经济结构转型背景下如何稳定煤炭铁路运输的探讨 [J]. *中国物流与采购*, (7): 44–45. [Ma X H, Kang X M, Liu C. 2021. Discussion on how to stabilize coal railway transportation under the background of economic structure transformation in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Logistics & Purchasing*, (7): 44–45.]
- 孟昕馨,帅娟. 2019. 四川省南向铁路货运通道研究 [J]. *铁道经济研究* (2): 6–10. [Meng X X, Shuai J. 2019. Study on southward railway freight transport corridor in Sichuan Province [J]. *Railway Economics Research*, (2): 6–10.]
- 苗壮,周鹏,李向民. 2013. 借鉴欧盟分配原则的我国碳排放额度分配研究: 基于ZSG环境生产技术 [J]. *经济学动态* (4): 89–98. [Miao Z, Zhou P, Li X M. 2013. Research on China’s carbon emission allowances allocation with reference to the EU allocation principle: based on the ZSG environmental production technology [J]. *Economic Perspectives*, (4): 89–98.]
- 任南琪,许志成,鲁垠涛,等. 2022. 铁路运营期碳排放特征及减排路径思考 [J]. *铁道标准设计*, 66(7): 1–6. [Ren N Q, Xu Z C, Lu Y T, et al. 2022. Thinking on carbon emission characteristics and emission reduction path in railway operation period [J]. *Railway Standard Design*, 66(7): 1–6.]
- 孙晶琪,周振茜,赵一航,等. 2025. “双碳”目标下碳市场与电力市场溢出效应研究 [J]. *现代电力*, 42(4): 831–839. [Sun J Q, Zhou Z X, Zhao Y H, et al. 2025. Research on spillover effect of carbon market and electricity market under the goals of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Modern Electric Power*, 42(4): 831–839.]
- 谭迎春,程永龙,顾佰和. 2023. 中国碳总量控制新进展: 省域碳配额分配研究综述 [J]. *气候变化研究进展*, 19(1): 63–73. [Tan X C, Cheng Y L, Gu B H. 2023. New progress in controlling the total volume of carbon emissions in China: a review on the allocation of provincial carbon emission allowances [J]. *Climate Change Research*, 19(1): 63–73.]
- 田佩宁,毛保华,童瑞咏,等. 2023. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析 [J]. *气候变化研究进展*, 19(3): 347–356. [Tian P N, Mao B H, Tong R Y, et al. 2023. Analysis of carbon emission level and intensity of China’s transportation industry and different transportation modes [J]. *Climate Change Research*, 19(3): 347–356.]
- 田璞,鲁垠涛,邱圣明,等. 2025. 京津冀地区铁路运输碳排放特征和减排潜力研究 [J]. *铁道标准设计*, 69(4): 8–16, 33. [Tian P, Lu Y T, Qiu S M, et al. 2025. Research on carbon emission characteristics and emission reduction potential of railway transport in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Railway Standard Design*, 69(4): 8–16, 33.]
- 万骁乐,毕力文,邱鲁连. 2022. 何种环境战略生态产生企业高绿色创新绩效?: 基于SSE框架的组态分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 32(9): 92–107. [Wan X L, Bi L W, Qiu L L. 2022. What kind of environmental strategic ecosystem could produce high green innovation performance in Chinese enterprises? based on SSE framework configurations [J]. *China Population, Resources and Environment*, 32(9): 92–107.]
- 王靖添,马晓明. 2021. 中国交通运输碳排放影响因素研究: 基于双层次计量模型分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(6): 1133–1142. [Wang J T, Ma X M. 2021. Influencing factors of carbon emissions from transportation in China: empirical analysis based on two-level econometrics method [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(6): 1133–1142.]
- 王军丽,刘琪,王梅英. 2023. 武汉交通枢纽经济高质量发展对策 [J]. *物流技术*, 42(4): 7–10. [Wang J L, Liu Q, Wang M Y. 2023. Countermeasures of high-quality development of transportation hub economy in Wuhan [J]. *Logistics Technology*, 42(4): 7–10.]
- 王文举,孔晓旭. 2022. 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*, 39(7): 113–132. [Wang W J, Kong X X. 2022. Analysis on China’s provincial carbon quota allocation based on the 2030 carbon peak goal [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 39(7): 113–132.]
- 王晓娟,田慧,孙小军. 2019. 交通基础设施建设对省份进口的影响: 来自公路与铁路里程数的证据 [J]. *宏观经济研究* (11): 158–165. [Wang X J, Tian H, Sun X J. 2019. Impact of transport infrastructure construction on provincial imports: evidence from road and railway mileage [J]. *Macroeconomics*, (11): 158–165.]
- 王勇,程瑜,杨光春,等. 2018. 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*, 38(8): 3180–3188. [Wang Y, Cheng Y, Yang G C, et al. 2018. Provincial decomposition of China’s carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets [J]. *China Environmental Science*, 38(8): 3180–3188.]
- 谢乃明,刘思峰. 2005. 离散GM(1, 1)模型与灰色预测模型建模机理 [J]. *系统工程理论与实践*, 1(1): 93–99. [Xie N M, Liu S F. 2005. Discrete GM (1, 1) and mechanism of Grey Forecasting Model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1(1): 93–99.]
- 叶伟勤. 2022. 成都局集团公司货运市场深度演变探讨 [J]. *铁道货运*, 40(7): 19–26. [Ye W Q. 2022. Research on deep evolution of freight transport market of China Railway Chengdu Group [J]. *Railway Freight Transport*, 40(7): 19–26.]
- 应慧刚. 2019. 长三角高速铁路旅客运输运营组织优化 [J]. *铁道运输与经济*, 41(2): 8–14. [Ying H G. 2019. An optimization of passenger operation organization of high-speed railway in

- Yangtze River Delta [J]. *Railway Transport and Economy*, 41(2): 8–14.]
- 于潇, 孙猛. 2015. 中国省际碳排放绩效及 2020 年减排目标分解 [J]. *吉林大学社会科学学报*, 55(1): 57–65, 172. [Yu X, Sun M. 2015. Study on the decomposition of China provincial carbon emission performance and the 2020 emission reduction targets [J]. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 55(1): 57–65, 172.]
- 张博, 何明洋. 2015. 基于全国统一碳市场下的中国各省市初始碳排放权分配方案研究 [J]. *云南财经大学学报*, 31(6): 102–113. [Zhang B, He M Y. 2015. Study on the plan of allocating the initial carbon emission rights across provinces in China based on the unified national carbon market [J]. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 31(6): 102–113.]
- 郑立群. 2012. 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*, 34(11): 2087–2096. [Zheng L Q. 2012. Sharing the carbon emission reduction responsibility across Chinese provinces: a zero sum gains DEA model [J]. *Resources Science*, 34(11): 2087–2096.]
- 中华人民共和国国务院. (2021-10-26) [2021-11-20]. 2030 年前碳达峰行动方案 [EB/OL]. (2021-10-26) [2021-11-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm. [State Council of the PRC. (2021-10-26) [2021-11-20]. Action plan for carbon dioxide peaking before 2030 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.]
- Bai P R, Ma Z Y, Wei X, et al. 2023. Allocation scheme selection for transportation carbon allowance-evidence from China's top ten economic regions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 428: 139310. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139310.
- Cai W G, Ye P Y. 2019. A more scientific allocation scheme of carbon dioxide emissions allowances: the case from China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 215: 903–912.
- Cheng Y L, Gu B H, Tan X C, et al. 2022. 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*, 837: 155798. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155798.
- Gomes E G, Lins M P E. 2008. Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 59(5): 616–623.
- Guo Y N, Tong Q, Li Z J, et al. 2022. Research on carbon emission quota of railway in China from the perspective of equity and efficiency [J]. *Sustainability*, 14(21): 13789. DOI: 10.3390/su142113789.
- 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.
- Kong Y C, Zhao T, Yuan R, et al. 2019. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 211: 222–232.
- Li W D, Jian J. 2022. The spatial spillover effect of high-speed railway on CO₂ emissions in China [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16: 100204. DOI: 10.1016/j.indic.2022.100204.
- Lin B L, Liu C, Wang H J, et al. 2017. Modeling the railway network design problem: a novel approach to considering carbon emissions reduction [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56: 95–109.
- Jin X, Zou B, Wang C, et al. 2019. Carbon emission allocation in a Chinese province-level region based on Two-Stage Network Structures [J]. *Sustainability*, 11(5): 1369. DOI: 10.3390/su11051369.
- Shi B B, Li N, Gao Q, et al. 2022. Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: evidence from China's carbon trading pilot policy [J]. *Journal of Environmental Management*, 319: 115650. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115650.
- Tone K. 2001. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 130(3): 498–509.
- Xu B, Lin B Q. 2016. Differences in regional emissions in China's transport sector: determinants and reduction strategies [J]. *Energy*, 95: 459–470.
- Yang M, Hou Y R, Ji Q, et al. 2020. Assessment and optimization of provincial CO₂ emission reduction scheme in China: an improved ZSG-DEA approach [J]. *Energy Economics*, 91: 104931. DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104931.
- Yu A, Lin X R, Zhang Y T, et al. 2019. Analysis of driving factors and allocation of carbon emission allowance in China [J]. *Science of the Total Environment*, 673: 74–82.
- Zhan D B. 2022. Allocation of carbon emission quotas among provinces in China: efficiency, fairness and balanced allocation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15): 21692–21704.
- Zhao R, Liu J, Long H, et al. 2023. A ZSG-DEA model with factor constraint cone-based decoupling analysis for household CO₂ emissions: a case study on Sichuan Province [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(40): 93269–93284.
- Zhao R, Min N, Geng Y, et al. 2017. Allocation of carbon emissions among industries/sectors: an emissions intensity reduction constrained approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 142: 3083–3094.
- Zhou P, Wang M. 2016. Carbon dioxide emissions allocation: a review [J]. *Ecological Economics*, 125: 47–59.
- Zuo J Y, Dong L W, Yang F, et al. 2023. Energy harvesting solutions for railway transportation: a comprehensive review [J]. *Renewable Energy*, 202: 56–87.