文章编号：1003-1421(2026)01-0110-10
引用格式：孙家振，卿芯，李敏，等.铁路运输行业碳定价机制设计与交易行为模拟研究[J].铁道运输与经济，2026，48(1)：110-119.
SUN Jiazhen，QING Xin，LI Min，et al. Design of Carbon Pricing Mechanism and Simulation of Trading Behavior for Railway Transportation Industry[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：110-119.

铁路运输行业碳定价机制设计与交易行为模拟研究

孙家振[1]，卿　芯[2]，李　敏[1]，俞　阳[2]，祝　仟[2]，刘　婕[1]

(1.中国中铁股份有限公司 中铁科学研究院集团有限公司，四川 成都　610031；2.西南交通大学环境科学与工程学院，四川 成都　611756)

摘　要：为探索铁路运输行业碳市场机制优化路径，基于2017—2020年18个铁路局集团公司碳排放数据，构建两阶段数据包络分析模型优化碳配额分配，采用不完全信息动态博弈理论设计交易定价机制，并通过代理人基(Agent-Based)模型模拟交易行为。结果显示，区域碳配额差异显著(212.64~722.11万t)，高配额与低配额铁路局集团公司的配额差达3.4倍；碳交易定价呈41~45元/t梯度分布，受买卖双方贴现因子和边际减排成本共同调控；博弈均衡下40%高配额低排放铁路局集团公司可通过出售配额实现收益最大化，而46%低配额高排放铁路局集团公司可优先选择市场手段进行减排。形成的动态配额优化-博弈定价-行为模拟技术体系，为铁路行业构建差异化碳市场和优化减排策略提供参考。

关键词：铁路运输；碳配额；碳定价；动态博弈；碳交易行为模拟
中图分类号：U2-9　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250320001

Design of Carbon Pricing Mechanism and Simulation of Trading Behavior for Railway Transportation Industry

SUN Jiazhen[1]，QING Xin[2]，LI Min[1]，YU Yang[2]，ZHU Qian[2]，LIU Jie[1]

(1. China Railway Academy Group Co., Ltd., China Railway Group Limited, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: To explore the optimization path of the carbon market mechanism in the railway transportation industry, based on the carbon emission data of 18 railway bureaus from 2017 to 2020, a two-stage data envelopment analysis model was constructed to optimize carbon quota allocation. An incomplete information dynamic game theory was used to design the transaction pricing mechanism, and trading behavior was simulated by an Agent-Based model. The results demonstrate that there are significant differences in regional carbon quotas (2 126 400~7 221 100 tons), and the extreme difference in quotas between high-quota railway bureaus and low-quota railway bureaus is up to 3.4 times. The pricing of carbon trading is characterized by a gradient distribution of 41~45 yuan/t. This distribution is a function of the buyer and seller discount factors and marginal abatement costs. 40% of high-quota and low-emission railway bureaus in the game equilibrium can maximize their revenue through the sale of quotas, while 46% of low-quota and high-emission bureaus demonstrate a

收稿日期：2025-03-20　　**修订日期**：2025-08-12
通信作者：李敏(1982—)，女，河南商丘人，中国中铁股份有限公司中铁科学研究院集团有限公司高级工程师。
基金项目：国家自然科学基金项目(42101315)；中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(科研院2022-重大-01，科研院2023-重大-06)；四川循环经济研究中心资助项目(XHJJ-2310)

preference for market-based instruments in reducing emissions. The established dynamic quota optimization, game pricing, and behavior simulation technology system provides a reference for the railway industry to build differentiated carbon markets and optimize emission reduction strategies.
Keywords: Railway Transportation; Carbon Quota; Carbon Pricing; Dynamic Game; Carbon Trading Behavior Simulation

0　引言

交通运输业贡献全球超20%的温室气体排放，其低碳转型对实现“双碳”目标至关重要[1-2]。2023年底我国铁路运输里程已达15.90万km，运量增长产生的碳排放年均增速达4.8%，与绿色发展目标形成显著冲突[3-4]。碳交易机制作为市场型减排工具，虽已覆盖电力、民航等行业[5]，但铁路行业仍面临3大瓶颈：一是碳排放核算体系不完善，二是缺乏行业内部碳配额分配标准，三是内部碳市场机制尚未形成。

基于政府分配的碳配额，企业为实现减排目标进行交易，形成碳交易市场。现有碳配额分配研究多采用零和数据包络分析(ZSG-DEA)等黑箱模型[6]，未能解析决策单元内部结构关联。Li等[7]在考虑决策单元内部结构的基础上，提出具有两阶段网络结构的固定成本分配模型；Jin等[8]基于两阶段DEA模型，得出2007—2016年间我国只有河南、湖北、湖南、广东、广西和海南6个省份存在碳排放容量。除了根据碳配额进行交易，碳交易价格也会影响碳市场的均衡与稳定。Zhou等[9]基于完全自适应噪声集成经验模态分解和长短期记忆，提出碳预测框架；Sun等[10]构建基于二次分解算法的碳价预测模型，在我国多个市场显示出高准确性；Niu等[11]基于欧盟碳市场交易价格数据实证分析，构建碳价预测系统。现有碳定价研究主要关注碳价影响因素，聚焦省级宏观预测，在跨区域比较和政策协同机制设计方面存在显著空白，亟待行业内部动态差异性分析的突破[12]。近年来，国内外学者逐渐将博弈理论用于碳交易定价机制设计。Wang等[13]提出基于博弈论和区块链的自动化执行和多方协作的碳交易机制；侯昊宇等[14]通过博弈方法优化碳价，实现经济环境效益的双重优化。上述研究虽拓展了博弈论的应用，但未从行业内部微观主体的视角刻画其动态交互机制。在碳交易行为模拟方面，Wu等[15]采用可计算一般均衡模型(CGE)模拟碳交易，探讨碳配额与碳价格的关系；陈晓红等[16]构建碳交易市场群体智能仿真模型，考察不同寻租环境下的碳交易及其对碳市场运行效率的影响；蒋超等[17]基于宏能源系统，动态模拟构建微观碳交易市场模型。同时有学者基于代理模型创建自适应代理(Agent)，模拟和预测多个Agent的决策和交互机制，杨洋等[18]揭示的铁路局集团公司间减排成本异质性为Agent行为模拟提供了依据；朱潜挺等[19]基于Agent建模技术开发了全球碳交易模拟系统；Wang等[20]基于Agent碳交易模拟系统，分析碳配额分配机制对交易的影响。

综上，现有碳交易定价和交易情景模拟研究主要集中于省级行政区及行业间，缺乏对行业内部决策行为及参与者行为的深入分析，特别是铁路运输行业尚无先例。基于此，本研究旨在提出一套铁路行业内部碳市场构建方法体系：首先构建动态两阶段DEA模型，通过“效率-公平”双流程优化配额分配；继而建立不完全信息动态博弈模型，量化贴现因子与边际减排成本对定价的影响；最后采用Agent-Based建模技术模拟18个铁路局集团公司的交易策略选择。本研究的创新体现在：一是突破省级尺度限制，首次建立行业内部碳交易分析框架；二是融合系统优化与博弈均衡理论，破解配额分配与定价机制的协同难题；三是借助智能代理仿真技术，实现铁路局集团公司碳交易行为的动态推演。研究成果可为铁路行业建立差异化碳市场、制定精准减排路径提供参考。

1　研究方法

1.1　铁路局集团公司碳配额设计

1.1.1　碳配额总量核算

本研究中的铁路运输碳排放量指国家铁路特定时间段内所有生产设施和业务活动所产生的二氧化碳排放[21]。直接碳排放主要是指化石燃料的燃烧，间接碳排放涵盖净购电力排放、车站用电设备消耗、铁路线路维修、热力使用和其他运输生产活动

过程的排放等。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)能源碳排放核算方法[22]，铁路运营过程直接和间接碳排放计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^{I} A_i \times F_i \tag{1}$$

$$E_d = E_{电} + E_{热} \tag{2}$$

$$E_{电} = AD_{电} + EF_{电} \tag{3}$$

$$E_{热} = AD_{热} + EF_{热} \tag{4}$$

式中：E，E_d分别为直接和间接碳排放量，tCO_2；A_i为第i种化石燃料的量，TJ；F_i为第i种燃料的排放因子，tCO_2/TJ；i，I分别为化石燃料类型和类型数量；$E_{电}$，$E_{热}$分别为铁路运营过程净购入使用电力和热力产生的碳排放量，tCO_2；$AD_{电}$为净购入使用电量，kW·h；$EF_{电}$为区域电网年平均供电排放因子，tCO_2/(kW·h)；$AD_{热}$为净购入热力量，GJ；$EF_{热}$为外购热力的碳排放因子，tCO_2/GJ。

根据《2030年前碳达峰行动方案》，我国承诺2030年碳排放强度较2005年降低60%~65%，本研究设定为60%以推算2030年碳排放强度，用单位客货周转量所产生的二氧化碳量表示为[23]

$$I_t = \frac{C_t}{G_t} \tag{5}$$

式中：I_t为t年的铁路运输行业碳排放强度，万t CO_2/(亿t·km)；C_t为t年的铁路运输行业碳排放量，万t；G_t为t年的铁路客货周转量，旅客周转量和货物周转量按系数比1∶1累加，即每一旅客运输人公里换算为每一货物运输吨公里，亿t·km。

G_{2030}采用谢乃明等[24]灰色预测模型GM(1，1)具体建模机理得到。2030年我国铁路运输行业碳排放总量计算公式为

$$C_{2030} = I_{2005} \cdot (1 - 60\%) \cdot G_{2030} \tag{6}$$

1.1.2　基于两阶段DEA网络模型的碳配额分配

根据公平原则中的平等主义、历史责任和效率原则，本研究将公正和效率视为非独立关系，采用两阶段DEA进行铁路局集团公司碳配额分配。根据Li等[25]的研究，两阶段DEA模型用于决策单元固定成本的分配，假设存在待分配的固定总成本R，对每个决策单元DMU_j(j=1，2，…，n)的分配量是R_j，即

$$\sum_{j=1}^{n} R_j = R;\ R_j \geqslant 0 \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

每个决策单元DMU_j的分配量R_j被分配给第一阶段和第二阶段，分别以R_{1j}和R_{2j}表示为

$$R_j = R_{1j} + R_{2j};\ R_{1j},\ R_{2j} \geqslant 0 \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, n \tag{8}$$

每个决策单元DMU_j，根据式(9)计算其处于评估状态时的总体效率[26]。

$$\theta_j^{*} = \max \frac{\sum_{p=1}^{q} \varphi_p z_{pj} + \varphi_0 + \sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} + \mu_0}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} + v_{m+1} R_{1j} + \sum_{p=1}^{q} \varphi_p z_{pj} + v_{m+1} R_{2j}}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \theta_{1j} = \dfrac{\sum_{p=1}^{q} \varphi_p z_{pj} + \varphi_0}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} + v_{m+1} R_{1j}} \leqslant 1 \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, n \\ \theta_{2j} = \dfrac{\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} + \mu_0}{\sum_{p=1}^{q} \varphi_p z_{pj} + v_{m+1} R_{2j}} \leqslant 1 \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, n \\ \sum_{j=1}^{n} R_{1j} + R_{2j} = R;\ \ R_{1j},\ R_{2j} \geqslant 0 \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, n \\ \mu_r,\ \varphi_p,\ v_i \geqslant 0 \qquad \forall r = 1, 2, \cdots, s;\ \ \forall p = 1, 2, \cdots, q;\ \ \forall i = 1, 2, \cdots, m \end{cases} \tag{9}$$

式中：θ_j^{*}为待评估DMU_j的总体效率值；θ_{1j}，θ_{2j}分别为第一、第二阶段效率值；μ_r，v_i分别为附加到第r个输出和第i个输入的未知权重；φ_p为附加到第p个中间产品的未知权重。

由于铁路运输的主要生产任务是安全、及时地完成客货运输并实现可持续发展。此过程可分解为2个递进阶段，第一阶段为运输生产阶段，以能源消耗、投入为输入，客货周转量为输出，期望以最低资源成本实现最大客货运输量，体现DEA模型中的效率原则。第二阶段为碳排放管理阶段，以客货周转量为输入，碳排放强度为输出，在保障运输任务的同时最小化碳排放强度，体现相对公正原则。铁路局集团公司公平与效率视角下碳配额分配的两阶段网络过程如图1所示。

1.1.3　基于ZSG-DEA模型的碳配额优化

上述方法虽兼顾公平与效率原则，但仅能给出初始状态的相对效率，无法引导各决策单元使所有铁路局集团公司的分配效率均达到最优[27]。因此，

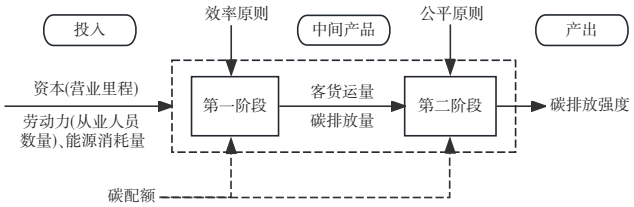

图1　公平与效率视角下碳配额分配的两阶段网络过程

Fig.1　Two-stage network process of carbon quota allocation from perspective of equity and efficiency

有必要对碳配额的分配结果进一步优化调整。

Gomes等[27]考虑*DMU*之间的生产依赖关系，提出ZSG-DEA模型，根据比例消减策略，保持碳排放总量不变并减少对投入k的使用，按比例分配给其他*DMU*。假设有N个*DMU*，每个*DMU*都有R个投入指标和M个产出指标，ZSG-DEA模型如式(10)所示。

$$\min \varphi_0$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i y_{ij} \geqslant y_{0j} & j=1,2,\ldots,M\\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i x_{ij}\left[1+\dfrac{x_{0k}(1-\varphi_0)}{\sum_{i\neq 0}x_{ik}}\right] \leqslant \varphi_0 x_{0k} & k=1,2,\ldots,R\\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i = 1 & i=1,2,\ldots,N\\ \lambda_i \geqslant 0 & i=1,2,\ldots,N\end{cases} \tag{10}$$

式中：φ_0为碳排放总量固定情况下DMU_0的相对效率；λ_i为对于DMU_0重新构造DMU_i的比例；x_{ij}，y_{ij}分别为第i个*DMU*的第j个投入和产出；x_{0k}，y_{0j}分别为被评估*DMU*对应的投入、产出要素。

1.2　碳定价机制设计

博弈论分为合作和非合作博弈、静态和动态博弈、完全信息和不完全信息博弈[28]。我国铁路运输行业属于垄断竞争行业，各铁路局集团公司间信息不完全透明，碳市场存在碳配额剩余和缺口，因此该协商过程是一个不完全信息动态博弈。本研究引入鲁宾斯坦讨价还价理论，建立不完全信息轮流讨价还价博弈模型，以分析铁路局集团公司间碳定价决策行为和协调过程。

1.2.1　模型假设

基本假设如下。①买方和卖方均为追求自己利益最大化的理性主体，且在谈判中有学习能力；②讨价还价中若有一方拒绝，博弈将演变成无限期的；③引入买卖双方贴现因子δ_1和δ_2($0<\delta_1$，$\delta_2<1$)，体现时间成本；④碳排放权交易量q是定值，双方就碳排放权单位价格进行谈判；⑤仅当买方单位边际减排成本c_1<卖方单位边际减排成本c_2时，交易才可能达成。

1.2.2　模型构建

将碳交易视作n阶段的讨价还价过程，买卖双方轮流出价，受轮次n奇偶性的影响。若n为奇数，则由卖方出价$p_{2,\ (n+1)/2}$，若买方接受，卖方收益为$\delta_2^{n-1}(p_{2,\ (n+1)/2}-c_2)q$，买方收益为$\delta_1^{n-1}(c_1-p_{2,\ (n+1)/2})q$，若买方拒绝，双方收益均为0；$n$为偶数，则由买方出价$p_{1,\ n/2}$，若卖方接受，卖方收益为$\delta_2^{n-1}(p_{1,\ n/2}-c_2)q$，买方收益为$\delta_1^{n-1}(c_1-p_{1,\ n/2})q$，若卖方拒绝，则双方收益均为0。碳交易轮流讨价还价博弈扩展图形如图2所示。

运用期望收益最大化和逆推归纳法得出第n阶段的碳定价为$p_n=\dfrac{\delta_1^{\,n-1}c_1+\delta_2^{\,n-1}c_2}{\delta_1^{\,n-1}+\delta_2^{\,n-1}}$，可见碳定价受买卖双方的边际减排成本影响，借鉴阮实惠[29]提出的碳排放影子价格模型，建立边际减排成本模型如式(11)所示。

$$c_{it}=\left|\frac{Y_{it}}{E_{it}}\cdot(a_0+a_L\ln L_{it}+a_K\ln K_{it}+2a_E\ln E_{it})\right| \tag{11}$$

式中：c_{it}为第t年i铁路局集团公司的边际减排成本，元；Y_{it}为第t年i铁路局集团公司的运输生产总值，亿元；L_{it}为第t年i铁路局集团公司的客货运量，同G_t一样，客运量和货运量按1∶1的累加系数折算，万t；E_{it}为第t年i铁路局集团公司的二氧化碳排放量，万t；K_{it}为第t年i铁路局集团公司的运输设备数量，万辆；a_0为扰动变量；a_L，a_K，a_E分别为与客运量、运输设备数量、二氧化碳排放量有关的系数。

1.3　碳交易市场模拟情景设计

在碳交易市场中，政府分配碳配额，企业通过最优决策实现减排目标。边际减排成本高于成交价格的高碳排放企业购买碳排放权，反之则采用技术减排。在碳交易中，各企业先确定期望交易价格和数量，交易中心再根据价格排序匹配买卖双方，若不满足成交条件，买方则选择技术减排。在铁路局集团公司碳交易模拟过程中，交易双方都将参与估计交易价格和金额、搜索交易对象、达成交易3步决策过程。碳交易市场机制设计流程如图3所示。

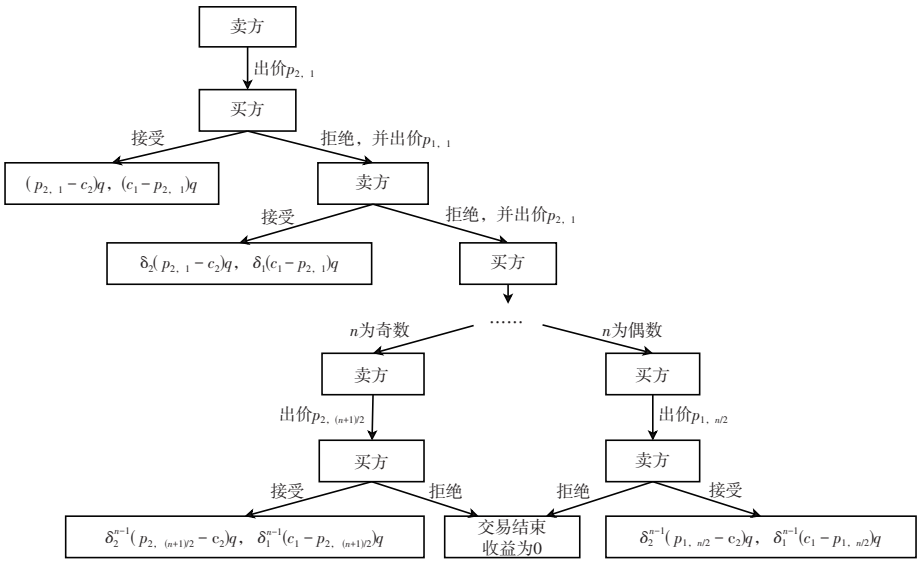

图2　碳交易轮流讨价还价博弈扩展图形

Fig.2　Expansion graph of alternating bargaining game in carbon trading

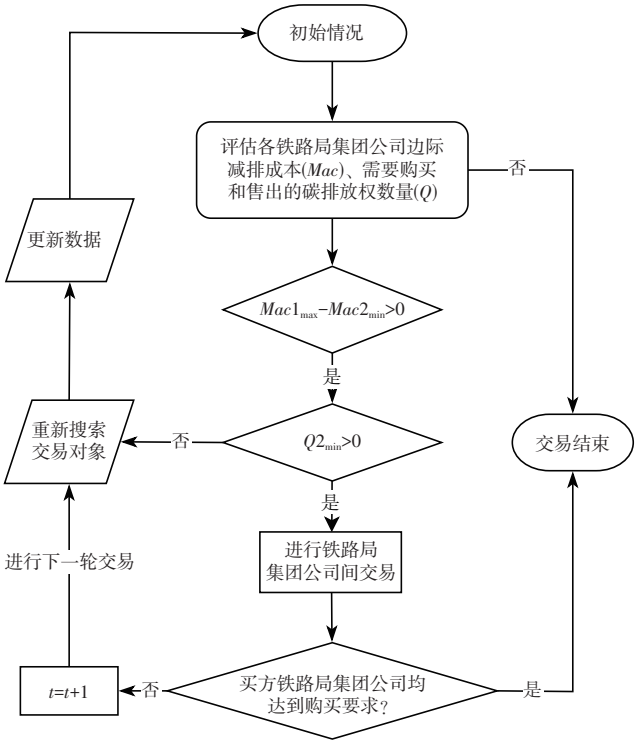

图3　碳交易市场机制设计流程

Fig.3　Design process of carbon trading market mechanism

表1　各铁路局集团公司碳排放量　　万t

Tab.1　Carbon emissions of each railway group

铁路局集团公司	铁路运输碳排放量			
	2017年	2018年	2019年	2020年
哈尔滨	299.22	300.77	305.39	275.64
沈阳	364.28	365.87	370.19	332.94
北京	360.48	374.08	383.19	349.00
太原	298.32	303.09	306.72	275.92
呼和浩特	292.44	298.02	302.85	273.59
郑州	311.25	329.71	333.53	299.91
武汉	332.32	341.23	354.15	327.26
西安	285.29	295.00	298.24	268.04
济南	347.32	353.84	359.84	325.31
上海	550.15	566.44	577.93	524.16
南昌	334.16	349.63	360.98	331.61
广州	466.02	484.09	494.99	449.95
南宁	299.43	307.73	310.21	278.01
成都	386.15	392.39	403.78	369.50
昆明	303.11	315.93	324.65	296.82
兰州	285.66	290.28	294.94	266.40
乌鲁木齐	300.94	308.62	312.20	280.75
青藏	267.06	274.38	278.33	250.98

2　计算结果分析

2.1　碳排放核算结果

各铁路局集团公司碳排放量如表1所示。上海、广州、成都局集团公司连续4年碳排放量居前3，主要源于其所管辖区路网规模密集，客运任务量大。青藏、兰州和西安局集团公司碳排放较少，其管辖区域多地处高原或沙漠地区，经济相对落后，客流量较少，铁路交通设施有待完善。

2.2　碳配额分配结果

2005年国家铁路客货周转量25 366.56亿t·km[30]，基于灰色预测模型GM(1，1)，预测2030年客货周转量为67 931.58亿t·km。模型经灰色系统理论验

证[31]，相对残差范围为0.95%~3.82%，均小于0.1，后验差比 C=0.021<0.35，表明模型精度为优秀；小误差概率P值为0.933<0.95，表明模型预测结果可靠。

我国2005年铁路运输的碳排放总量为5 522.03万t[32]，通过式(5)和(6)得到2030年的碳排放为5 915.12万t。2005—2030年，客货周转量增长168%，碳排放总量年均增长率仅约0.3%，体现了碳配额机制与强度目标对总量增长的有效抑制，与“双碳”政策导向一致。

2.2.1　铁路局集团公司碳配额分配结果

基于两阶段DEA网络模型的碳配额分配结果如图4所示。碳配额排名较为靠前的铁路局集团公司为北京、上海、太原，靠后的为哈尔滨、沈阳。碳配额分配第一阶段与投入产出效率直接相关，体现效率原则。效率值越高单位排放对应的运输产出更高，因此初始配额更多给高效率主体，如北京、上海等；第二阶段引入排放强度约束，确保经济欠发达区域的铁路局集团公司的基本配额保障，如青藏，体现相对公平原则。

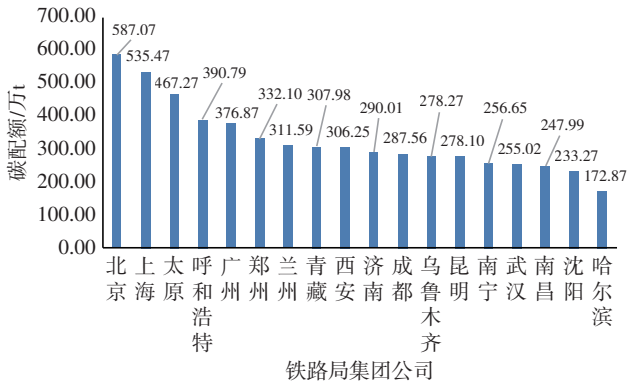

图4　基于两阶段DEA网络模型的碳配额分配结果

Fig.4　Results of carbon quota allocation based on two-stage DEA network model

2.2.2　铁路局集团公司碳配额优化结果

基于ZSG-DEA模型的碳配额分配优化结果如表2所示。初始DEA得分显示，各铁路局集团公司中仅沈阳、哈尔滨、北京、太原、呼和浩特的分配效率达到1，因此采用ZSG-DEA模型结果进行再优化分配，经过3次迭代再分配，分配效率得分均达到1，故以此碳配额分配结果作为后续碳交易数据基础。基于ZSG-DEA优化的动态两阶段碳配额分配，使碳配额由经济较发达的东部地区向西部欠发达地区递减、由铁路网络完善地区向稀疏地区递减、由煤炭资源生产丰富地区向能源需求旺地递减，符合经济合理性。其中北京局集团公司碳配额最多，为722.11万t，昆明局集团公司、哈尔滨局集

表2　基于ZSG-DEA模型的碳配额分配优化结果

Tab.2　Optimization of carbon quota allocation based on ZSG-DEA model

铁路局集团公司	初始碳配额分配/万t	初始DEA得分	第1次迭代数值/万t	第1次迭代DEA得分	第2次迭代数值/万t	第2次迭代DEA得分	第3次迭代数值/万t	第3次迭代DEA得分
哈尔滨	172.87	1.000 0	205.87	1.000 0	212.46	1.000 0	212.64	1.000 0
沈阳	233.27	1.000 0	277.79	1.000 0	286.68	1.000 0	286.93	1.000 0
北京	587.07	1.000 0	699.11	1.000 0	721.49	1.000 0	722.11	1.000 0
太原	467.27	1.000 0	556.44	1.000 0	574.25	1.000 0	574.75	1.000 0
呼和浩特	390.79	1.000 0	465.38	1.000 0	480.27	1.000 0	480.68	1.000 0
郑州	332.10	0.826 0	334.27	0.969 1	334.01	0.999 1	333.96	1.000 0
武汉	255.02	0.782 2	245.64	0.959 3	243.08	0.998 8	242.97	1.000 0
西安	306.25	0.954 4	349.98	0.992 6	358.41	0.999 8	358.63	1.000 0
济南	290.01	0.795 4	282.97	0.962 5	280.87	1.000 0	281.11	1.000 0
上海	535.47	0.594 5	398.90	0.918 8	376.92	0.997 8	376.35	1.000 0
南昌	247.99	0.837 8	253.33	0.971 0	253.77	0.999 1	253.75	1.000 0
广州	376.87	0.715 5	334.29	0.945 5	325.66	0.998 4	325.39	1.000 0
南宁	256.65	0.802 7	252.70	0.963 8	251.23	0.998 9	251.15	1.000 0
成都	287.56	0.832 7	291.89	0.970 2	292.08	0.999 1	292.05	1.000 0
昆明	278.10	0.632 9	224.04	0.921 7	212.98	0.997 6	212.64	1.000 0
兰州	311.59	0.705 0	274.04	0.941 9	266.11	0.998 3	265.85	1.000 0
乌鲁木齐	278.27	0.672 1	235.64	0.932 8	226.68	0.998 0	226.39	1.000 0
青藏	307.98	0.587 8	232.84	0.908 8	218.18	0.997 3	217.75	1.000 0

团公司碳配额最少，均为212.64万t，可知高排放效率铁路局集团公司配额量高达低效主体的3.4倍。

2.3　碳定价机制

基于铁路行业内部n阶段讨价还价博弈模型，得到完美贝叶斯纳什均衡结果如下。若n为奇数，卖方出价，若卖方提议价格$p_n \leqslant \frac{\delta_1^{n-1}c_1 + \delta_2^{n-1}c_2}{\delta_1^{n-1} + \delta_2^{n-1}}$，买方接受；反之拒绝，交易结束；若$n$为偶数，买方出价，若买方提议价格$p_n \geqslant \frac{\delta_1^{n-1}c_1 + \delta_2^{n-1}c_2}{\delta_1^{n-1} + \delta_2^{n-1}}$，卖方接受；反之拒绝，交易结束。

根据边际减排成本计算公式及各阶段讨价还价定价模型，基于2020年基准排放水平和2030年碳减排目标，明确铁路局集团公司的市场定位及边际减排成本如表3所示(按照边际减排成本由高到低排序)。可以看出铁路碳交易市场中，碳配额高于现有碳排放水平作为卖方的有5个铁路局集团公司，分别是北京、郑州、呼和浩特、太原、西安；其他13个铁路局集团公司碳配额不足，作为买方。边际减排成本较高的铁路局集团公司为上海、北京、广州，较低的为青藏、兰州、哈尔滨。

2.4　碳交易市场模拟结果

以2020年碳排放为基准，采用Agent-Based模型，模拟18个铁路局集团公司在2030年碳减排目标下的碳交易行为，交易时边际减排成本最高的买方与最低的卖方进行交易。碳交易市场初始模拟结果如图5所示。

以上海局集团公司为例，探讨内部碳交易过程。上海局集团公司碳交易过程如图6所示。在第一轮以44.17元/t的价格购入西安局集团公司全部碳配额90.59万t，碳排放需求由147.81万t递减为57.22万t，并继续进行交易；第二轮以44.20元/t的价格从太原局集团公司购入57.22万t，满足全部需求后退出市场；而太原局集团公司仍有剩余，继续向下一个买方售出。

碳交易最终模拟结果如图7所示，上海、广州、济南、成都、武汉、沈阳局集团公司购入其全部所需碳配额，北京、郑州、呼和浩特局集团公司未能全部售出，南宁等7个铁路局集团公司边际减排成本为2.64~13.90元/t，显著低于市场价格下限41元/t，自行减排成本节约率达66.4%~93.6%，采用技术手段更具经济优势。研究结果表明，各铁路局集团公司结合市场化和技术手段，可最小化成本地实现铁路系统2030年的碳减排目标。

结果显示，40%卖方售出全部碳配额，46%买

表3　铁路局集团公司的市场定位及边际减排成本

Tab.3　Market positioning and marginal emission reduction cost of railway groups

铁路局集团公司	2030年碳配额/万t	2020年的碳排放/万t	差值/万t	买方/卖方	边际减排成本/(元/t)
上海	376.35	524.16	−147.81	买方	72.12
北京	722.11	349.00	373.11	卖方	59.82
广州	325.39	449.95	−124.56	买方	50.45
济南	281.11	325.31	−44.20	买方	47.37
郑州	333.96	299.91	34.05	卖方	39.57
成都	292.05	369.50	−77.45	买方	39.55
武汉	242.97	327.26	−84.29	买方	27.06
沈阳	286.93	332.94	−46.01	买方	24.67
呼和浩特	480.68	273.59	207.09	卖方	18.69
太原	574.75	275.92	298.83	卖方	16.28
西安	358.63	268.04	90.59	卖方	16.21
南宁	251.15	278.01	−26.86	买方	13.90
南昌	253.75	331.61	−77.86	买方	13.71
乌鲁木齐	226.39	280.75	−54.36	买方	13.22
昆明	212.64	296.82	−84.18	买方	13.01
哈尔滨	212.64	275.64	−63.00	买方	9.44
兰州	265.85	266.4	−0.55	买方	9.29
青藏	217.75	250.98	−33.23	买方	2.64

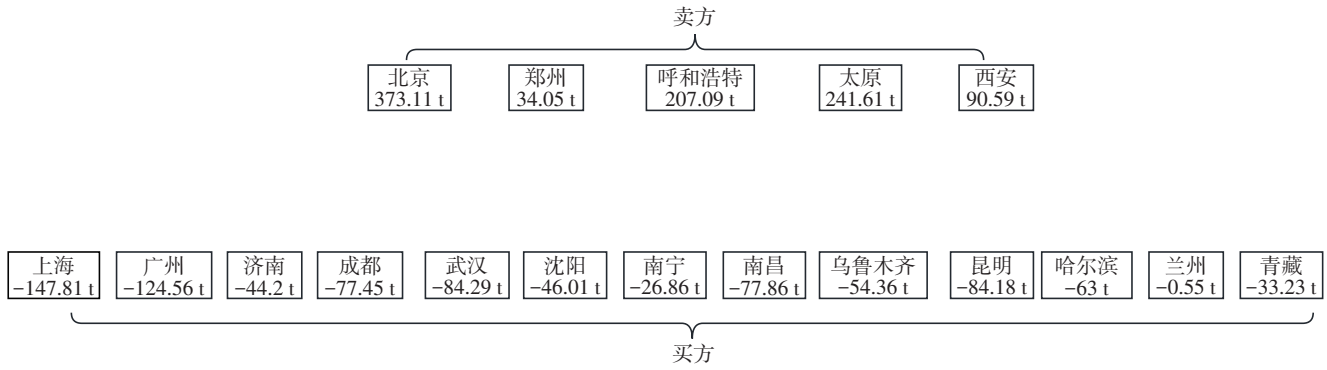

图5　碳交易市场初始模拟结果

Fig.5　Initial simulation results of carbon trading market

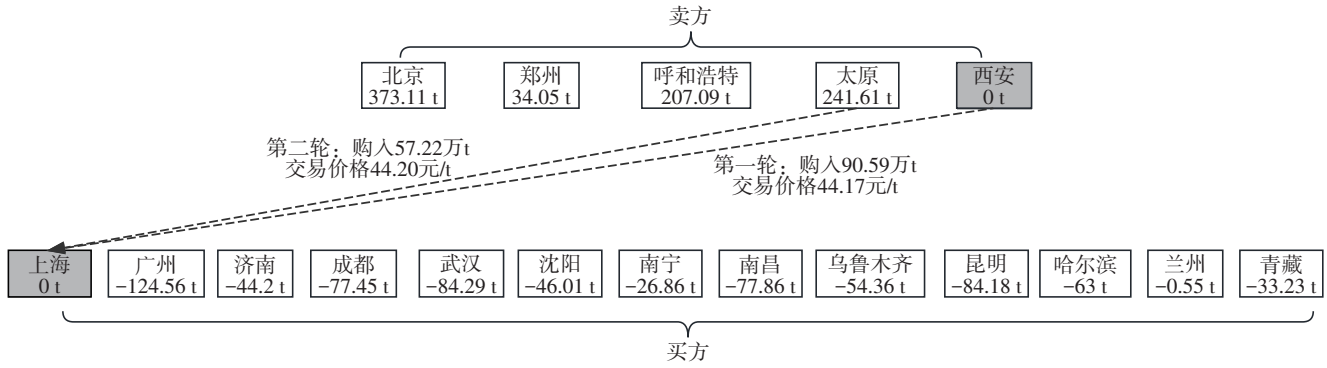

图6　上海局集团公司碳交易模拟过程

Fig.6　Carbon trading simulation process of Shanghai Railway Group

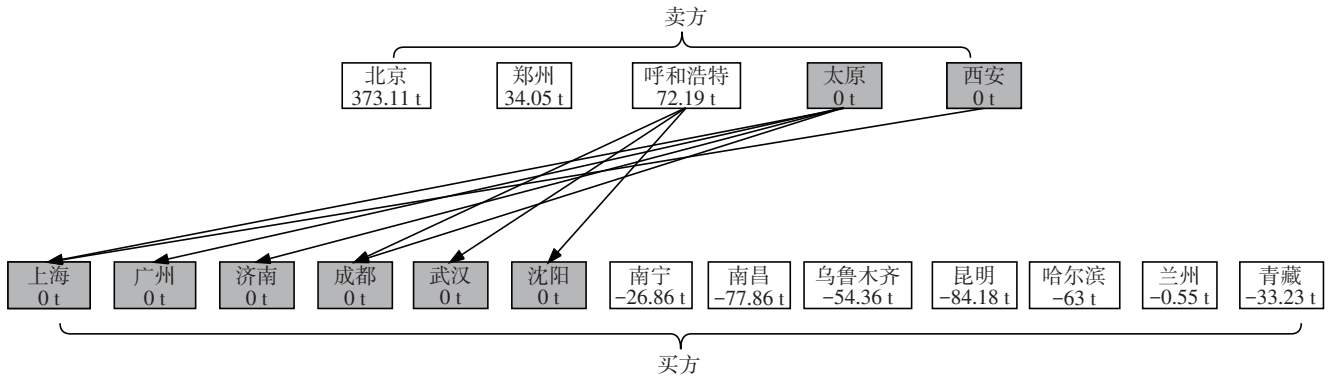

图7　碳交易最终模拟结果

Fig.7　Final simulation results of carbon trading

方购入全部所需碳配额；铁路局集团公司碳交易的定价范围为41~45元/t，根据《中国碳市场年度报告2022年&2023年》，2021—2023年全国碳市场成交价格在41~83元/t不等，本研究定价结果符合全国碳交易市场的可接受水平。

3　结论

本研究聚焦铁路运输行业碳市场机制方法体系构建的核心问题，以提升减排效率为目标，提出“配额分配–定价决策–行为模拟”三位一体的方法论体系，模拟了18个铁路局集团公司在2030年碳减排目标下的碳交易行为。研究结论如下。

（1）构建公平与效率协同优化的动态两阶段碳配额分配模型，突破传统单维度分配范式。通过数据包络分析量化解析行业内部结构关联，使高排放效率铁路局集团公司配额量达到低效主体的3.4倍，显著提升资源配置科学性。

（2）建立不完全信息动态博弈碳定价内生决策

机制，以贴现因子与边际成本双重调控议价模型揭示行业内部交易价区间41~45元/t，破解传统省级定价忽视主体差异的局限，为跨区域碳交易成本优化提供新路径。

（3）采用Agent-Based模型，模拟18个铁路局集团公司动态博弈过程，实现“成本-收益-策略”微观决策推演，40%高配额低排放主体可通过出售配额提升收益，而46%低配额高排放主体可通过市场手段减排以降低减排成本，为差异化减排策略制定提供量化工具。

参考文献：

[1] FONSECA-SOARES D D，ELIZIÁRIO S A，GALVINCIO J D，et al. Greenhouse Gas Emissions in Railways：Systematic Review of Research Progress[J]. Buildings，2024，14(2)：539.

[2] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 城市轨道交通低碳效应研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：8-23，57.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Review on Research of Low-Carbon Effects in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：8-23，57.

[3] LIN B L，LIU C，WANG H J，et al. Modeling the Railway Network Design Problem：A Novel Approach to Considering Carbon Emissions Reduction[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2017，56：95-109.

[4] 刘　皓. 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，2023，45(6)：145-152.
LIU Hao. Research on Carbon Neutrality Strategies of Railway Transport Enterprises in Foreign Typical Countries and Inspirations[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(6)：145-152.

[5] 段力伟，高慧艳. 碳交易机制下考虑需求不确定的多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：40-52.
DUAN Liwei，GAO Huiyan. Route Optimization of Multimodal Transport Considering Demand Uncertainty under Carbon Trading Mechanism[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：40-52.

[6] YANG K J，LEI Y L，CHEN W M，et al. Carbon Dioxide Emission Reduction Quota Allocation Study on Chinese Provinces Based on Two-Stage Shapley Information Entropy Model[J]. Natural Hazards，2018，91(1)：321-335.

[7] LI F，ZHU Q Y，CHEN Z. Allocating a Fixed Cost across the Decision Making Units with Two-Stage Network Structures[J]. Omega，2019，83：139-154.

[8] JIN X，ZOU B，WANG C，et al. Carbon Emission Allocation in a Chinese Province-Level Region Based on Two-Stage Network Structures[J]. Sustainability，2019，11(5)：1369.

[9] ZHOU F T，HUANG Z H，ZHANG C H. Carbon Price Forecasting Based on CEEMDAN and LSTM[J]. Applied Energy，2022，311：118601.

[10] SUN W，HUANG C C. A Carbon Price Prediction Model Based on Secondary Decomposition Algorithm and Optimized back Propagation Neural Network[J]. Journal of Cleaner Production，2020，243：118671.

[11] NIU X S，WANG J Y，WEI D X，et al. A Combined Forecasting Framework Including Point Prediction and Interval Prediction for Carbon Emission Trading Prices[J]. Renewable Energy，2022，201：46-59.

[12] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 交通运输业碳足迹测算及其交互效应评估：以京津冀地区为例[J]. 北京交通大学学报，2023，47(6)：74-81.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Carbon Footprint Measurement in Transportation Sector and Assessment of Its Interaction Effects：A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2023，47(6)：74-81.

[13] WANG B B，XU L，WANG J L. A Privacy-Preserving Trading Strategy for Blockchain-Based P2P Electricity Transactions[J]. Applied Energy，2023，335：120664.

[14] 侯昊宇，葛晓琳，曹旭丹. 考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(3)：77-85.
HOU Haoyu，GE Xiaolin，CAO Xudan. Coalition Game Optimization Method for Multiple Virtual Power Plants Considering Carbon Trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2023，35(3)：77-85.

[15] WU Q L，LI C X. How Quota Allocation Affects the Unified ETS of China：A Simulation with Dynamic CGE Model[J]. Environmental Science and Pollution Research，2020，27(2)：1835-1851.

[16] 陈晓红，汪　静，胡东滨. 碳配额免费分配法下寻租对市场运行效率影响[J]. 系统工程理论与实践，2018，38(1)：93-101.
CHEN Xiaohong，WANG Jing，HU Dongbin. Study on the

Effect of Rent-Seeking on Carbon Emission Trading Market Performance under Free Carbon Emission Allowances[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2018，38(1)：93-101.

[17] 蒋　超，薛禹胜，黄　杰，等. 碳市场风险的分析与控制(二)沙盘推演[J]. 电力系统自动化，2018，42(14)：1-7，31.
JIANG Chao，XUE Yusheng，HUANG Jie，et al. Carbon Market Risk Analysis and Control Part Ⅱ Sand-Table Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(14)：1-7，31.

[18] 杨　洋，杨晓彤，黄守刚，等. 道口群约束下铁路内燃机车牵引节能运行综合建模[J]. 铁道运输与经济，2025，47(5)：16-26.
YANG Yang，YANG Xiaotong，HUANG Shougang，et al. Comprehensive Modeling for Energy-Saving Operation of Railway Diesel Locomotive Traction under Constraint of Crossing Group[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(5)：16-26.

[19] 朱潜挺，吴　静，王　铮. 基于自主体的全球碳交易模拟[J]. 地理研究，2012，31(9)：1547-1558.
ZHU Qianting，WU Jing，WANG Zheng. Research on Carbon Trading Market：An Agent-Based Simulation[J]. Geographical Research，2012，31(9)：1547-1558.

[20] WANG J W，SONG Y H，WANG W，et al. Marine Construction Waste Recycling Mechanism Considering Public Participation and Carbon Trading：A Study on Dynamic Modeling and Simulation Based on Sustainability Policy[J]. Sustainability，2022，14(16)：10027.

[21] 李晓易，吴　睿. 交通运输温室气体核算边界和测算方法研究[J]. 气候变化研究进展，2023，19(1)：84-90.
LI Xiaoyi，WU Rui. Research on Greenhouse Gas Emissions Accounting Boundaries and Calculating Method of the Transport Sector[J]. Climate Change Research，2023，19(1)：84-90.

[22] 朱松丽，蔡博峰，朱建华，等. IPCC国家温室气体清单指南精细化的主要内容和启示[J]. 气候变化研究进展，2018，14(1)：86-94.
ZHU Songli，CAI Bofeng，ZHU Jianhua，et al. The Main Content and Insights of 2019 Refinements to IPCC 2006 Guidelines[J]. Climate Change Research，2018，14(1)：86-94.

[23] 王靖添，马晓明. 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)，2021，57(6)：1133-1142.
WANG Jingtian，MA Xiaoming. Influencing Factors of Carbon Emissions from Transportation in China：Empirical Analysis Based on Two-Level Econometrics Method[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2021，57(6)：1133-1142.

[24] 谢乃明，刘思峰. 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，2005，25(1)：93-99.
XIE Naiming，LIU Sifeng. Discrete GM(1，1) and Mechanism of Grey Forecasting Model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2005，25(1)：93-99.

[25] LI F，ZHU Q Y，CHEN Z. Allocating a Fixed Cost across the Decision Making Units with Two-Stage Network Structures[J]. Omega，2019，83：139-154.

[26] LIN R Y. Allocating Fixed Costs and Common Revenue via Data Envelopment Analysis[J]. Applied Mathematics and Computation，2011，218(7)：3680-3688.

[27] GOMES E G，LINS M P E. Modelling Undesirable Outputs with Zero Sum Gains Data Envelopment Analysis Models[J]. Journal of the Operational Research Society，2008，59(5)：616-623.

[28] ABDALZAHER M S，SEDDIK K，ELSABROUTY M，et al. Game Theory Meets Wireless Sensor Networks Security Requirements and Threats Mitigation：A Survey[J]. Sensors，2016，16(7)：1003.

[29] 阮实惠. 城市交通运输系统的碳排放交易货币化模型研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2017.

[30] 铁道部档案史志中心. 中国铁道年鉴2005[A]. 北京：铁道部档案史志中心，2006.

[31] 张巨峰. 基于GM(1，1)模型的甘肃省碳排放灰色预测研究[J]. 煤，2024，33(10)：1-5.
ZHANG Jufeng. Grey Prediction of Carbon Emission in Gansu Province Based on GM(1，1) Model[J]. Coal，2024，33(10)：1-5.

[32] 谢汉生，周新军，黄　茵，等. 铁路运营碳排放测算及低碳效应评价研究[J]. 铁道工程学报，2014，31(3)：117-122.
XIE Hansheng，ZHOU Xinjun，HUANG Yin，et al. Research on the Measurement of Carbon Emission from Railway Operation and Evaluation of Low-Carbon Effect[J]. Journal of Railway Engineering Society，2014，31(3)：117-122.

(责任编辑　李丹丹)