



交通运输系统工程与信息

Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology

ISSN 1009-6744, CN 11-4520/U

《交通运输系统工程与信息》网络首发论文

题目： 基于社会成本最低的货运补贴政策评估与优化
作者： 刘昭然，闫学东，诸立超
收稿日期： 2026-02-26
网络首发日期： 2026-05-27
引用格式： 刘昭然，闫学东，诸立超. 基于社会成本最低的货运补贴政策评估与优化 [J/OL]. 交通运输系统工程与信息.
<https://link.cnki.net/urlid/11.4520.U.20260527.0847.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于社会成本最低的货运补贴政策评估与优化

刘昭然^{1,2}, 闫学东³, 诸立超^{*4}

(1. 北京交通大学, 交通运输学院, 北京 100044; 2. 中国宏观经济研究院综合运输研究所, 北京 100038; 3. 西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 611756; 4. 浙江财经大学, 管理学院, 杭州 310018)

摘要: 补贴是各地政府优化运输结构的重要政策, 但从成本收益角度而言, 现有货运补贴政策有效性如何、补贴金额怎样优化尚不明晰。为此, 本研究构建了基于社会成本(包含外部成本、运输成本、时间成本和补贴等四要素)最低的货运补贴政策评估框架, 并将其应用于青岛港九个出口集装箱内陆段货运通道, 进而评估与优化现有补贴政策。结果表明, 在无补贴前提下, 为完成单位货物运输, 九个通道公路运输链的社会成本均高于铁路运输链。在现有相同补贴政策下, 有两个通道铁路运输链单位货运量社会成本反超公路运输链, 仅聊城-青岛与菏泽-青岛两个通道的社会成本有所下降, 九条通道的社会总成本从无补贴情景的 52.267 亿元降至现有补贴政策的 51.891 亿元, 表明政策整体有效, 但局部失效并存在优化空间。若采用使各通道社会成本最小化的差异化补贴政策, 能够使九个通道的社会总成本进一步降至 51.759 亿元, 分别较无补贴、现有补贴政策降低社会成本 0.508 亿元、0.132 亿元, 并较现有补贴政策补贴总额降低 367 万元。

关键词: 交通运输经济; 社会成本; 成本收益分析; 补贴政策; 政策评估

中图分类号: U-9

文献标志码: A

Assessment and Optimization of Freight Subsidy Policies Based on Social Cost Minimization

LIU Zhaoran^{1,2}, YAN Xuedong³, ZHU Lichao^{*4}

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Comprehensive Transportation, Chinese Academy of Macroeconomic Research, Beijing 100038, China; 3. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 4. School of Management, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Subsidy policies are commonly used by governments to optimize transportation structures. However, from a social cost perspective, the effectiveness of current freight subsidy policies and the potential for optimization remain unclear. To address this, this study proposes an evaluation framework for freight subsidy policies based on minimizing social costs (comprising four elements: external costs, transportation costs, time costs, and subsidies). This framework is applied to nine inland freight corridors for export containers at the Qingdao Port, aiming to assess and optimize existing subsidy policies. The results show that, without subsidies, the social costs of road transportation chains for unit cargo transportation are higher than those of rail transportation chains across all nine corridors. Under the current uniform subsidy policy, the unit freight social costs of rail transportation chains exceed those of road

收稿日期: 2026-02-26

修回日期: 2026-04-23

录用日期: 2026-05-06

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目/ The Post-funding Project for the National Social Fund of China (22FJYB027); 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (72574138)。

作者简介: 刘昭然(1989-), 男, 吉林榆树人, 副研究员, 博士生。

*通信作者: zhulichao@zufe.edu.cn

引用格式: 刘昭然, 闫学东, 诸立超. 基于社会成本最低的货运补贴政策评估与优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2026, 26(2): 00-00. [LIU Z R, YAN X D, ZHU L C. Assessment and Optimization of Freight Subsidy Policies Based on Social Cost Minimization[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2026, 26(2): 00-00.

transportation chains in two corridors, and only the Liaocheng-Qingdao and Heze-Qingdao corridors exhibit reduced social costs. The total social cost across the nine corridors decreases from 5.2267 billion yuan in the no-subsidy scenario to 5.1891 billion yuan under the current subsidy policy, indicating overall policy effectiveness but with localized inefficiencies and room for optimization. If a differentiated subsidy policy aimed at minimizing social costs for each corridor is adopted, the total social cost could be further reduced to 5.1759 billion yuan, representing a reduction of 508 million yuan compared to the no-subsidy scenario and 132 million yuan compared to the current subsidy policy, while also reducing the total subsidy amount by 3.67 million yuan.

Keywords: transportation economics; social costs; cost-benefit analysis; subsidy policies; policy evaluation

0 引言

2024年,中国国内货物周转量达14.24万亿吨公里,其中公路、铁路和水路运输的货物周转量占比分别为53.98%、25.19%和15.34%。公路运输灵活性高、覆盖范围广,长期在货运中占据主导,但也带来了更多的拥堵和污染。为优化运输结构、降低物流成本和促进节能减排,各级各地政府广泛实施针对铁路和水路运输的补贴政策。以青岛港为例,山东省政府实施的货运补贴政策,有力支撑了其海铁联运集装箱量连续十一年位居全国第一,2025年提升至282.9万标箱。虽然补贴政策能够推动“公转铁、公转水”,但若仅量化补贴政策带来的运量转移或节能减排等产出效果,而不考虑政策投入成本,则所有补贴政策必然是有效的,并且补贴强度越高,政策有效性越强。这种忽略投入成本的评价方法并不能真实反映政策效果,亟需综合考虑全社会的成本和收益,对补贴政策进行更加全面合理的评价。

诸多学者关注补贴政策的有效性,并且发现评估结果随目标发生变化。从货运转移量、方式竞争力、能耗排放或外部成本角度而言,伴随补贴强度的增加,政策有效性不断增强。例如,描述政府与托运人博弈关系的双层规划模型,在上海港、宁波舟山港及其腹地运输网络的应用结果表明,补贴会促进公海联运货物转向海铁联运^[1]。另一项采用双层规划模型的研究表明,当货运网络算例的补贴强度从0增加至0.14元/吨公里,公铁联运竞争力显著增强,但当补贴强度超过0.14元/吨公里后,其竞争力伴随补贴强度增加而提升不显著^[2]。对于宁波-义乌集装箱通道而言,通过构建离散选择模型,得到200元/标箱的铁路运输链补贴强度能使碳排放降低2.07%的结论^[3];950元/高箱的补贴强度,则能使通道外部成本降低0.37%^[4]。然而,从成本收益角度而言,补贴政策有效性随时空发生变化。例如,现有中欧班列补贴政策带来的社会效益低于政府补贴支出,成本收益比平均仅0.69,表明补贴政策处于低效状态^[5]。值得注意的是,越来越多的研究关注个性化补贴政策的设计与评估,并且大多采用双层规划模型。例如,考虑线路拥堵双层规划模型所得的差异化补贴政策,能够帮助中欧班列市场占有率从3.04%提升至3.16%、且补贴总额降低26.15%^[6]。针对承运商和政府的博弈分析表明,为提升社会福利,当转运港拥堵水平低、中欧班列与海运替代性高时,应对国内海运商征收碳税;当拥堵水平和替代性均低时,应对国外海运商和铁路承运商提供补贴;当拥挤水平低和替代性高时,补贴和碳税政策均能使货主转向低碳方式^[7]。

综上,既有研究对补贴政策的设计和有效性评估开展了广泛研究,并取得了丰硕成果。然而,同一行政区域内的补贴政策大多按照统一标准执行,或按距离调整,缺乏个性化的政策设计^[8]。此外,学者们主要关注补贴政策对货运量和能耗排放的影响,缺少从系统层面评估政策的成本和收益。为此,本研究提出一套基于社会成本最低的货运补贴政策评估框架,旨在量化补贴强度对外部成本、运输成本、时间成本和补贴等社会成本四要素的影响。其中,补贴增量代表政策成本,由此带来的外部成本、运输成本和时间成本等三项成本减量代表政策收益。进而,将这一框架应用于青岛港九

个出口集装箱内陆段货运通道，对现有补贴政策进行评估和优化，以期找到使各通道社会成本最低的个性化补贴政策。

1 基于社会成本最低的货运补贴政策评估框架

1.1 框架构建

在货运活动中，社会成本由外部成本、运输成本、时间成本和补贴等四方面构成，分别主要由公众、托运人/收货人、托运人/收货人和政府承担。其中，外部成本是指，货物门到门运输过程中产生，但未通过市场交易由托运人或收货人承担，而转嫁给社会整体负担的各类损失或资源消耗；运输成本是指，托运人或收货人为完成货物门到门运输而支付的费用；时间成本是指，货物在门到门运输过程中所消耗时间的价值；补贴是指，政府为促进公路货运量转向铁路或水路而对后者实行的费用补助。在本研究中，目标函数为最小化货运通道 f 社会成本 Z_f ：

$$\min Z_f = \sum_i v_f p_{f,i} z_{f,i} \quad (1)$$

式中： v_f 代表通道 f 货运量； $p_{f,i}$ 代表通道 f 运输链 i ($i = r_1, r_2, w$ ，分别代表公路、铁路和水路运输链)分担率，它受到铁路运输链补贴强度 $s_{f,r2}$ 和水路运输链补贴强度 $s_{f,w}$ 的共同影响，可表示为 $p_{f,i}(s_{f,r2}, s_{f,w})$ ； $z_{f,i}$ 代表通道 f 运输链 i 单位运量的社会成本，可表示为：

$$z_{f,i} = e_{f,i} + f_{f,i} + x_{f,i,t} \times t_f + s_{f,i} \quad (2)$$

式中： $e_{f,i}$ 代表通道 f 运输链 i 单位运量的外部成本，将在 1.2 节详细介绍； $f_{f,i}$ 代表通道 f 运输链 i 单位运量的运输成本，通过调研获取； $x_{f,i,t}$ 代表通道 f 运输链 i 单位运量的运输时间，通过调研获取； t_f 代表通道 f 的时间价值，通过离散选择模型中时间与费用的参数比值得到； $s_{f,i}$ 代表通道 f 运输链 i 单位运量的补贴强度，为实际情况或根据模型优化得到。

约束条件为通道 f 所有运输链分担率之和为 1：

$$\sum_i p_{f,i} = 1 \quad (3)$$

如前所述，可基于效用最大化的多项 logit (multinomial logit, MNL) 或混合 logit (mixed logit, ML) 等离散选择模型建立通道 f 运输链 i 市场份额 $p_{f,i}$ 的函数：

$$p_{f,i} = \frac{e^{V_{f,i}}}{\sum_j e^{V_{f,j}}} \quad (4)$$

式中： i 和 j 均代表运输链； $V_{f,i}$ 代表研究者所观测到的决策者选择通道 f 运输链 i 时的可观测效用。当通道 f 运输链 i 的补贴强度为 $s_{f,i}$ 时，运输链 i 的费用从 $x_{f,i,c}$ 降低至 $x_{f,i,c} - s_{f,i}$ 。此时，可观测效用 $V_{f,i}$ 可表示为：

$$V_{f,i} = \sum_{k=1, k \neq c}^{K_{f,i}} \beta_{f,k} x_{f,i,k} + \beta_{f,c} (x_{f,i,c} - s_{f,i}) + A_{f,i} \quad (5)$$

式中： $x_{f,i,k}$ 代表通道 f 运输链 i 第 k 个变量值； β 和 A 为待估计参数，前者代表决策者为相应变量赋予的决策权重，后者代表运输链特定常数项。当参数 β 为固定值时， $p_{f,i}$ 可通过 MNL 模型计算；当参数 β 服从特定分布时， $p_{f,i}$ 可通过 ML 模型计算。

综上，通道 f 运输链 i 的补贴强度 $s_{f,i}$ 通过两条路径影响通道 f 社会成本 Z_f ：(1) $s_{f,i} \rightarrow V_{f,i} \rightarrow p_{f,i} \rightarrow Z_f$ ，即补贴强度 $s_{f,i}$ 影响托运人面临运输链 i 的效用 $V_{f,i}$ (式(5))，效用 $V_{f,i}$ 进一步影响运输链 i 的分担率 $p_{f,i}$ (式(4))，而分担率 $p_{f,i}$ 影响社会成本 Z_f (式(1))；(2) $s_{f,i} \rightarrow z_{f,i} \rightarrow Z_f$ ，即补贴强度 $s_{f,i}$ 影响运输链 i 单位运量社会成本 $z_{f,i}$ (式(2))，而单位运量社会成本 $z_{f,i}$ 影响社会成本 Z_f (式(1))。为计算通道 f 社

会成本最低的运输链 i 补贴强度 s_{fi} ，令 s_{fi} 取值从 0 变化到 $x_{f,i,c}$ 、步长为 1 元，基于上述 s_{fi} 对 Z_f 的影响路径和计算公式，计算得到 $s_{fi}=0,1,2\dots x_{f,i,c}$ 对应的社会成本。通过枚举模拟和比较，得到令通道 f 社会成本 Z_f 取到最小值的 s_{fi} 。据此，进一步比较各通道在无补贴情景、现有补贴政策 and 最优补贴政策（即社会成本最低）下的社会成本。若最优补贴政策的社会成本等于无补贴情景，表明当前补贴政策是低效的，可考虑取消当前补贴政策；若最优补贴政策的社会成本低于无补贴情景和现有补贴政策，表明需要调整当前补贴强度以增强其有效性；若最优补贴政策的社会成本等于现有补贴政策，表明现有补贴政策最有效，无需调整。

1.2 单位运量外部成本计算方法

1.1 节构建了基于社会成本最低的货运补贴政策评估框架，但我们仍然需要知晓式(2)中单位运量的外部成本，才能计算不同补贴强度下的社会成本。其中，运输成本通过调研获取，时间成本根据时间价值计算得到，当前补贴政策通过调研获取，而最优补贴政策需要使用 1.1 节框架计算得到。相较于运输成本、时间成本和补贴，外部成本的构成更加复杂。在货运领域，通常考虑事故成本、空气污染成本、气候变化成本和噪音污染成本等四类外部成本^[9,10]。虽然每条运输链涉及多个作业环节，但由于干线运输和短驳运输是外部成本的主要来源，因而本研究聚焦这两个作业环节。据此，通道 f 运输链 i 单位运量的外部成本 $e_{f,i}$ 可定义为：

$$e_{f,i} = e_{f,i,1} + e_{f,i,2} + e_{f,i,3} + e_{f,i,4} \quad (6)$$

式中： $e_{f,i,1}$ ， $e_{f,i,2}$ ， $e_{f,i,3}$ 和 $e_{f,i,4}$ 分别代表通道 f 运输链 i 单位运量的事故成本、空气污染成本、气候变化成本和噪音污染成本。上述四项外部成本又可进一步拆解为：

$$e_{f,i,1} = \begin{cases} u_{f,i,1} \times D_{f,i} & i = r_1 \\ u_{f,i,1} \times D_{f,i} + u_{f,r_1,1} \times d_{f,r_1} & i \neq r_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$e_{f,i,2} = \begin{cases} u_{f,i,2} \times D_{f,i} & i = r_1 \\ u_{f,i,2} \times D_{f,i} + u_{f,r_1,2} \times d_{f,r_1} & i \neq r_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$e_{f,i,3} = \begin{cases} \sum_z (H_z h_{f,i,z}) \times D_{f,i} \times C_{EF} \times C_T & i = r_1 \\ \left[\sum_z (H_z h_{f,i,z} D_{f,i}) + h_{f,r_1} d_{f,r_1} \right] \times C_{EF} \times C_T & i \neq r_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$e_{f,i,4} = \begin{cases} u_{f,i,4} \times D_{f,i} & i = r_1 \\ u_{f,i,4} \times D_{f,i} + u_{f,r_1,4} \times d_{f,r_1} & i \neq r_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $u_{f,i,1}$ ， $u_{f,i,2}$ ， $u_{f,i,3}$ 和 $u_{f,i,4}$ 分别代表通道 f 运输链 i 单位周转量的事故成本、空气污染成本、气候变化成本和噪音污染成本； r_1 代表公路运输链； $D_{f,i}$ 和 d_{f,r_1} 分别代表通道 f 运输链 i 的干线运输距离和短驳运输距离； H_z 代表第 z 种能源的使用比例； $h_{f,i,z}$ 代表通道 f 运输链 i 使用第 z 种能源完成单位周转量的能耗； C_{EF} 代表碳排放因子； C_T 代表碳市场配额价格。

总体上，事故成本根据总产量法进行修正，空气污染成本采用“自下而上”法核算，气候变化成本采用避免成本法计算，噪声污染成本采用成果参照法计算。由于交通外部成本同时产生于固定源和移动源，导致不同空间的交通外部成本存在相关性，并且考虑到研究对象的数据不可得，因而本研究采用全国平均参数而非研究对象特定参数。

1.2.1 事故成本

事故成本可分为直接财产损失、人员生命损失和社会救助成本等。**直接财产损失方面，2024 年公路运输为 9.1 亿元；**铁路运输缺乏 2024 年数据，最新数据为 2020 年的 1126.23 万元，根据 2020 年和 2024 年铁路货物周转量比值，**估计得到 2024 年铁路运输直接财产损失为 1323.59 万元。**

人员生命损失包括死亡人员劳动价值损失和死亡人员亲属精神损失。基于总产量法，通过修正 2004 年参数，计算 2024 年死亡人员劳动价值损失 $u_{f,i,1}^{l,2024}$ ：

$$u_{f,i,1}^{l,2024} = \frac{G_{DPPC}^{2024}}{\sum_{w=1}^{15} S_w^{2004}} \times \sum_{w=1}^{15} \Phi_w^{2024} \times S_w^{2004} \times \left[\sum_{k_1=1}^{L_w} \left(\frac{1+G}{1+K} \right)^{k_1-1} + \sum_{k_2=1}^{P_w} \frac{1}{4} \left(\frac{1+G}{1+K} \right)^{k_2-1} \right] \quad (11)$$

式中： G_{DPPC}^{2024} 代表我国 2024 年人均 GDP，为 95749 元； S_w^{2004} 代表 2004 年第 w 个年龄段死亡人数，数据源自《中国统计年鉴》； Φ_w^{2024} 代表 2024 年与 2004 年我国在第 w 个年龄段的人口分布之比； L_w 和 P_w 分别代表因交通事故造成第 w 个年龄段损失的完全和部分劳动能力时间； G 代表经济增长率，基于未来 GDP 增速预估，取值 4%； K 代表社会折现率，基于十年期国债利率，取值 2%；根据上式计算得到 **2024 年公路运输伤亡人员劳动价值损失为 3309406 万元/人。**

运用投入产出理论和灰色决策方法，结合现有数据完整性，选取年龄为主要投入因素，计算死亡人员亲属精神损失：

$$u_{f,i,1}^{q,2024} = G_{DPPC}^{2024} \times \frac{\sum_{w=1}^7 A_w B_w M_w}{\sum_{w=1}^7 A_w} \quad (12)$$

$$B_w = \frac{\frac{r_w}{\max r_w}}{\sum_{w=1}^7 \frac{r_w}{\max r_w}} \quad (13)$$

式中： A_w 、 B_w 、 M_w 和 r_w 分别代表第 w 个年龄段的死亡人数（7077 人、15729 人、25174 人、23139 人、16736 人、9369 人和 9851 人）、投入产出系数、有效余生和效果向量。根据灰色决策思想，将死亡作为事件 a ，年龄作为对策 b_w ，则局势 $S_w = (a, b_w)$ ， b_w 应对 a 的效果为 r_w 。根据《中国统计年鉴》和《道路交通事故统计年报》，将年龄分为 1-15、16-25、26-35、36-45、46-55、56-65 和 65 岁以上七个年龄段。将各年龄段中间值作为白化值，各年龄段有效余生按期望寿命 75 岁计算，即七个年龄段的效果向量 $r_w = (8 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70)$ ，有效余生向量 $M_w = (67 \ 55 \ 45 \ 35 \ 25 \ 15 \ 5)$ 。由于精神损失越小越好，因此在计算局势效果测度时采用式(13)的上限效果测度矩阵，计算得到 $B_w = (0.201 \ 0.504 \ 0.755 \ 1.007 \ 1.259 \ 1.511 \ 1.763)$ 。将上述信息带入式 (12)，计算得到 **2024 年公路交通事故死亡人员对家属造成的精神损失为 2708167 元/人。**除公路运输外，其他运输方式的事故死亡人数没有按年龄统计，基于人人平等原则，人员生命损失并不因运输方式产生差异，表明 **2024 年交通事故人员生命损失成本为 6017573 元/人。**

在发生交通事故后，交通设施设备也会遭到破坏。为消除事故影响、使资源尽可能恢复原状，保险公司、急救中心、交通部门、消防机构和公检法机关等社会公共机构需要消耗资源处理交通事故，这导致它们减少了用于其他活动的资源，由此造成的成本称为社会救助成本。因难以计算社会救助成本，参照保险公司处理事故的理赔费用，将上述五个部门处理每起交通事故的成本视为相同。具体而言，2024 年交强险单次事故平均赔付金额为 608 元，即 **2024 年交通事故的社会救助成本为 3040 元/起。**

根据 2024 年公路和铁路运输的换算周转量，结合上述直接财产损失、人均生命损失和社会救助成本，计算得到 **2024 年公路和铁路运输单位周转量的事故成本分别为 0.0529 元/吨公里和 0.0004 元/吨公里。**

1.2.2 空气污染成本

空气污染成本是指，相关经济活动导致的空气污染，进而引发的外部损害成本。对于交通运输业而言，由于载运工具的不同，导致各种运输方式的空气污染物排放量也存在差异。不同运输方式单位周转量空气污染成本计算公式如下：

$$u_{f,i,3} = \sum_{k=1}^5 u_{f,i,3}^k c_{f,i,3}^k \quad (14)$$

式中： $u_{f,i,3}^k$ 代表通道 f 运输方式 i 单位周转量的第 k 种空气污染物排放量，单位为克/吨公里； $c_{f,i,3}^k$ 代表通道 f 运输方式 i 第 k 种空气污染物的单位排放成本，单位为元/千克；本研究考虑一氧化碳、氮氧化物、颗粒物、二氧化硫和碳氢化合物等五种空气污染物。根据表 1 所列不同运输方式的空气污染物排放量及其成本数据，计算得到 **2024 年公路和铁路运输单位周转量的空气污染成本分别为 0.0348 元/吨公里和 0.0077 元/吨公里。**

表 1 公路和铁路运输的空气污染物排放量及其排放成本

Table 1 Air pollutant emissions and costs of road and rail transportation

空气污染物	公路运输 (克/吨公里)	铁路运输 (克/吨公里)	排放成本 (元/千克)
CO	0.174	0.027	0.007
NO _x	0.647	0.140	39.696
PM	0.039	0.006	132.281
SO ₂	0.045	0.021	49.141
HC	0.089	0.016	19.848

注：数据源于文献[11]，已转换为 2024 年数据。

1.2.3 气候变化成本

气候变化成本是指，为应对气候变化带来的影响和减少温室气体排放所付出的所有经济代价总和。其中，公路和铁路运输排放的温室气体主要是二氧化碳，还有少量甲烷和一氧化二氮，其变暖潜能值分别为 1、25 和 310^[12]。根据公路和铁路运输常用能源的二氧化碳、甲烷和一氧化二氮排放系数，结合二氧化碳当量值计算公式，即二氧化碳当量值=二氧化碳排放量+甲烷排放量×25+一氧化二氮排放量×310，得到各自的二氧化碳当量值，如表 2 所示。在表格最后一列，给出了不同能源二氧化碳当量值与二氧化碳的比值，最大为 104.48%。这意味着，即便用每种能源的二氧化碳排放量近似为温室气体排放量，其误差值也不超过 5%。鉴于目前没有关于各种运输方式各类能源消耗量的公开数据，此处仅考虑二氧化碳当量计算气候变化成本。

表 2 公路和铁路运输常用能源的二氧化碳、甲烷和一氧化二氮排放系数

Table 2 Emission factors of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide for common energy sources of road and rail transportation

能源类型	运输方式	kg CO ₂ /kg (L)	kg CH ₄ /kg (L)	kg N ₂ O/kg (L)	kg CO ₂ e/kg (L)	CO ₂ e/CO ₂
标准煤		3.14	2.93×10 ⁻⁵	4.40×10 ⁻⁵	3.1610	100.67%
汽油	公路	2.26	8.16×10 ⁻⁴	2.61×10 ⁻⁴	2.3613	104.48%

柴油	公路、铁路	2.73	1.44×10^{-4}	1.44×10^{-4}	2.7782	101.77%
----	-------	------	-----------------------	-----------------------	--------	---------

注：数据源自文献[13]；CO₂代表二氧化碳；CO_{2e}代表二氧化碳当量。

对于公路运输而言，2024年发布的《中国公路货运大数据碳排放报告》显示，2018-2023年重型卡车碳排放量分别为1.33亿吨、1.64吨、1.96亿吨、2.32亿吨、2.15亿吨和2.23亿吨。鉴于2021-2023年重型卡车碳排放量在2.2-2.3亿吨波动，推测2024年重型卡车碳排放量为2.3亿吨。根据2024年行业数据和权威机构测算，重型卡车的燃油消耗占整个公路运输的48%-52%，此处取50%，可知2024年公路运输碳排放为4.6亿吨。在此基础上，乘以系数1.05得到二氧化碳当量为4.83亿吨。2024年全国碳市场配额平均价格为91.8元/吨，可知**2024年公路运输单位周转量的气候变化成本为0.0057元/吨公里**。

对于铁路运输而言，《2024年铁道统计公报》显示，2024年百万换算吨公里能耗为3.86吨标准煤（1千克标准煤热值约29307千焦），其中内燃机车和电力机车分别为0.78万台和1.47万台。此外，根据生态环境部《关于发布2024年电力碳足迹因子数据的公告》，2024年全国电力平均碳足迹因子为0.5777千克CO_{2e}/千瓦时（1千瓦时热值约3600千焦）；全国碳市场配额平均价格为91.8元/吨。综上，**2024年铁路运输单位周转量的气候变化成本为0.0015元/吨公里**。

1.2.4 噪声污染成本

噪声污染是指，发生源的噪声超过国家规定的环境噪声标准，造成人们的工作、学习和其他活动无法正常开展的现象。由于噪声特点复杂，导致噪声污染成本计算尚无统一标准。欧盟相关研究表明，噪声污染成本与人口密度和经济水平紧密相关，且各种运输方式的噪声污染成本在十几年间波动很小。因此，本研究参照欧盟研究，通过调整人口密度和人均GDP指标，类推得到中国不同运输方式的噪声污染成本：

$$u_{f,i,4} = \phi \psi_g \psi_p u_{f,i,4}^e \quad (15)$$

式中： $u_{f,i,4}$ 代表运输方式*i*单位周转量的噪声污染成本，单位为元/吨公里； ϕ 代表欧元与人民币的汇率，2024年平均为7.7841； ψ_g 代表中国与欧盟的人均GDP购买力平价比值，2024年为0.4813（2.71万美元/人÷5.63万美元/人）； ψ_p 代表中国与欧盟的人口密度比值，2024年为1.2296（151.86人/平方公里÷123.5人/平方公里）； $u_{f,i,4}^e$ 代表欧盟第*i*种运输方式单位周转量的噪声污染成本，通过将2010年数据转为2024年可比价格，得到2024年公路和铁路货运单位周转量的噪声污染成本分别为0.0093欧元/吨公里和0.0060欧元/吨公里^[14]。据此，计算得到**2024年公路和铁路运输单位周转量的噪声污染成本分别为0.0427元/吨公里和0.0276元/吨公里**。

1.2.5 外部成本结果汇总

图1汇总了公路和铁路运输为完成单位货物周转而产生的事故成本、空气污染成本、气候变化成本和噪声污染成本，进而得到两种运输方式的外部成本，分别为0.1361元/吨公里和0.0372元/吨公里。就公路运输而言，事故成本、噪声污染成本和空气污染成本等三项占到了外部成本的95%以上；特别是事故成本和噪声污染成本，占比分别为38.87%和31.37%，而气候变化成本占比仅4.19%。就铁路运输而言，噪声污染成本在外部成本中的占比高达74.19%，远超其他三项；占比第二的为空气污染成本，为20.70%，而气候变化成本和事故成本这两项成本占比仅5.11%。

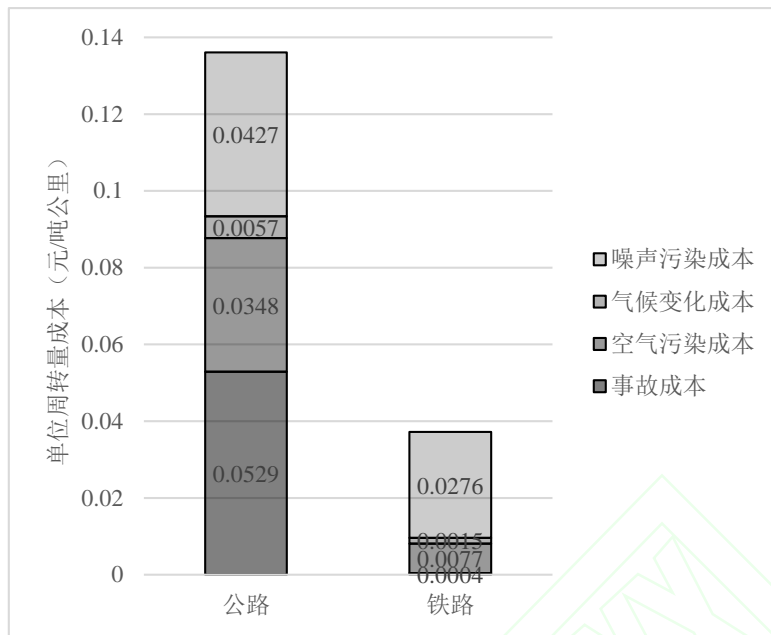


图 1 公路和铁路运输单位周转量的外部成本

Fig.1 External cost per unit of freight turnover for road and rail transportation

2 案例简介

本研究提出的货运补贴政策评估框架，适用于不同地区的集装箱和非集装箱货运通道。为使研究结果更具现实意义，本研究聚焦青岛港九个具有代表性的出口集装箱内陆段货运通道，分别为济南-青岛、淄博-青岛、聊城-青岛、滨州-青岛、德州-青岛、菏泽-青岛、济宁-青岛、枣庄-青岛和临沂-青岛通道。其中，青岛港出口集装箱货源大部分来自山东省内，主要通过公路或铁路运输链运抵青岛港出口。2024 年 11 月，通过访谈调研青岛港和九个通道铁路货运部门的管理人员、货主和货代等相关利益主体，获取各通道公路和铁路运输链的相关数据，如表 3 所示。其中，铁路运输链费用均值为考虑政府补贴后托运人实际承担费用。

表 3 青岛港九个出口集装箱内陆段货运通道公路和铁路运输链情况

Table 3 Road and rail transportation chain situation of nine inland freight corridor for export containers of Qingdao Port

通道	费用均值 (元/标箱)		时间均值 (小时)		2023 年运量 (标箱)		平均运距 (公里)	
	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路
济南-青岛	2350	1679	12	19	60000	22500	322	364
淄博-青岛	1935	1464	11	19.5	100000	6000	253	271
聊城-青岛	3205	2333	14	17	250000	150000	431	517
滨州-青岛	2235	1455	10	19.5	60000	15800	312	308
德州-青岛	3490	2565	15	15	10000	57000	441	438
菏泽-青岛	2605	1738	17	21	150000	50000	493	633
济宁-青岛	2405	1815	15	20.5	150000	1000	384	501
枣庄-青岛	2305	1783	14	19.5	150000	14000	356	485
临沂-青岛	2205	1501	12	17	150000	230	239	312

注：每个货运通道的铁路运输链可能涉及多个铁路发送站，故铁路运输距离以多个铁路发送站至铁路黄岛港站的均值计，两头公路短驳距离经调查以 20 公里计。

3 不同补贴政策下的社会成本测算

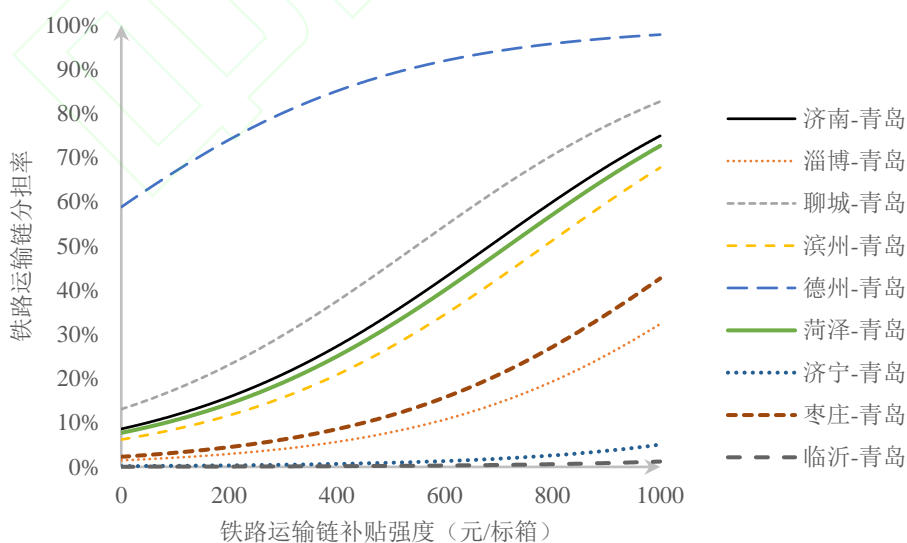
3.1 选择行为模型参数估计

鉴于九个通道问卷调查的高成本和长周期，本研究以 250 个标箱为一个场景，将表 3 集计的年运量数据转换为非集计的选择行为数据，共生成 5586 个场景。结合文献梳理和实地调研，选取运输链费用和时间作为 MNL 模型核心变量，并利用 NLOGIT 软件估计参数，结果如表 4 所示。模型 McFadden 决定系数 $\rho^2(0)$ 为 0.348，介于学界认可的 0.2~0.4 区间，表明包含运输链费用 and 时间的 MNL 模型能较好地揭示各通道运输结构的变化规律。此外，运输链费用 and 时间的参数估计值均为负，且显著性水平高于 0.01，表明托运人对某条运输链的选择概率会随费用或时间的增加而下降，符合预期。进而，将运输链时间参数除以运输链费用参数，得到时间价值为 30.32 元/(小时·标箱)，表明托运人愿意为节省一小时运输链时间而多支付 30.32 元。基于上述参数估计值，进一步针对每个通道校准其常数项，从而真实反映每个通道运输结构，据此进行敏感性分析(图 2)和政策模拟(3.3 节)。图 2 展示了九个通道铁路运输链分担率随补贴强度增加和时间缩短的变化。总体上，由于德州-青岛通道铁路运输链分担率较高，同一补贴强度增加或时间缩短将带来比其他通道更多的铁路运输链分担率增量，而其他八个通道的铁路运输链分担率增量则随补贴强度的增加或时间的缩短呈现先增后减的趋势。

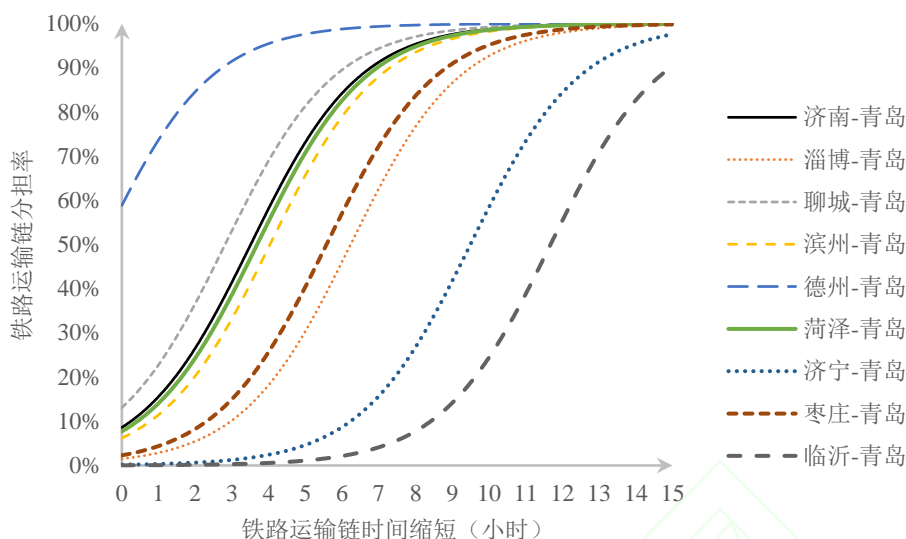
表 4 MNL 模型参数估计结果

Table 4 Estimation results of the multinomial logit model parameters

变量	参数	估计值	p 值
运输链费用	β_c	-5.580×10^{-3}	0.000
运输链时间	β_t	-1.692×10^{-1}	0.000
$LL(0)$		-3871.920	
$LL(\beta)$		-2526.248	
$\rho^2(0)$		0.348	



(a) 补贴强度



(b) 时间缩短

图 2 各通道铁路运输链分担率对其补贴强度和运输链时间的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of rail modal share across corridors with respect to subsidy intensity and transportation chain time

3.2 单位运量外部成本测算

通过调查发现，山东省出口集装箱平均货重为 15 吨/标箱。进而，根据式(2)以及图 1 中公路和铁路运输单位周转量外部成本，结合九个通道公路和铁路运输链的干线和短驳运距，计算得到九个通道公路和铁路运输链单位运量的外部成本、运输成本和时间成本，如表 5 所示。就单位运量外部成本而言，九个通道铁路运输链的取值从 180.89 元/标箱变化至 382.88 元/标箱，但始终低于同一通道的公路运输链（取值为 487.92 元/标箱至 1006.46 元/标箱）。类似的，铁路运输链的单位运量运输成本始终低于同一通道的公路运输链，前者从 1864 元/标箱变化至 2965 元/标箱，后者从 1935 元/标箱变化至 3490 元/标箱。据此，计算九个通道公路和铁路运输链的单位运量社会成本，见表 5 最右两列。在无补贴情景下，九个通道铁路运输链单位运量社会成本从 2620.21 元/标箱变化至 3693.87 元/标箱，均低于同一通道公路运输链（取值为 2785.02 元/标箱至 4845.10 元/标箱）。在现有补贴政策下，即九个通道铁路运输链补贴强度为 400 元/标箱、补贴总额为 1.266 亿元，导致淄博-青岛和枣庄-青岛两个通道的铁路运输链社会成本高于公路运输链。

表 5 无补贴情景下九个通道公路和铁路运输链单位运量社会成本

Table 5 Social cost per unit freight volume of road and rail transportation chains across nine corridors under no-subsidy scenario

通道	外部成本 (元/标箱)		运输成本 (元/标箱)		时间成本 (元/标箱)		社会成本 (元/标箱)	
	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路	公路	铁路
济南-青岛	657.36	232.78	2350	2079	363.84	576.08	3371.20	2887.86
淄博-青岛	516.50	180.89	1935	1864	333.52	591.24	2785.02	2636.13
聊城-青岛	879.89	318.16	3205	2733	424.48	515.44	4509.37	3566.60
滨州-青岛	636.95	201.53	2235	1855	303.2	591.24	3175.15	2647.77
德州-青岛	900.30	274.07	3490	2965	454.8	454.8	4845.10	3693.87
菏泽-青岛	1006.46	382.88	2605	2138	515.44	636.72	4126.90	3157.60

济宁-青岛	783.94	309.23	2405	2215	454.8	621.56	3643.74	3145.79
枣庄-青岛	726.77	300.30	2305	2183	424.48	591.24	3456.25	3074.54
临沂-青岛	487.92	203.77	2205	1901	363.84	515.44	3056.76	2620.21

3.3 社会成本最低的补贴政策

图 3 模拟了九个通道铁路运输链补贴强度从 0 增加至 1000 元/标箱的社会成本变化。伴随铁路运输链补贴强度的增加，仅菏泽-青岛与聊城-青岛通道的社会成本呈现明显拐点，其余七个通道仅小幅波动。此外，聊城-青岛通道的社会成本（17.4~18.4 亿元）显著高于其余通道（2.2~8.2 亿元）。为便于展示，图中采用双纵坐标，聊城-青岛通道对应右轴，其余通道对应左轴。

基于图 3，表 6 进一步给出了各通道在无补贴情景、现有补贴政策和最优补贴政策的补贴强度和社会成本。与无补贴情景相比，在现有补贴政策中，九个通道的社会总成本有所下降，从 52.267 亿元降至 51.891 亿元，表明现有补贴政策对于降低社会成本是有效的；就每个通道的社会成本而言，仅有聊城-青岛和菏泽-青岛两个通道的社会成本有所下降，分别从 17.545 亿元和 8.104 亿元降至 17.223 亿元和 7.969 亿元；其余七个通道反倒因补贴而抬高了社会总成本，合计 0.466 亿元的补贴总效果为负值，说明补贴政策存在局部失效问题。在最优补贴政策中，除淄博-青岛通道调整为无需补贴外，其余八个通道则需要 80 元/标箱至 530 元/标箱不等的铁路运输链补贴强度，从而使九个通道的社会总成本从现有补贴政策的 51.891 亿元进一步降低至 51.759 亿元，而对应补贴总额可从现有补贴政策的 1.266 亿元降低至 1.229 亿元。

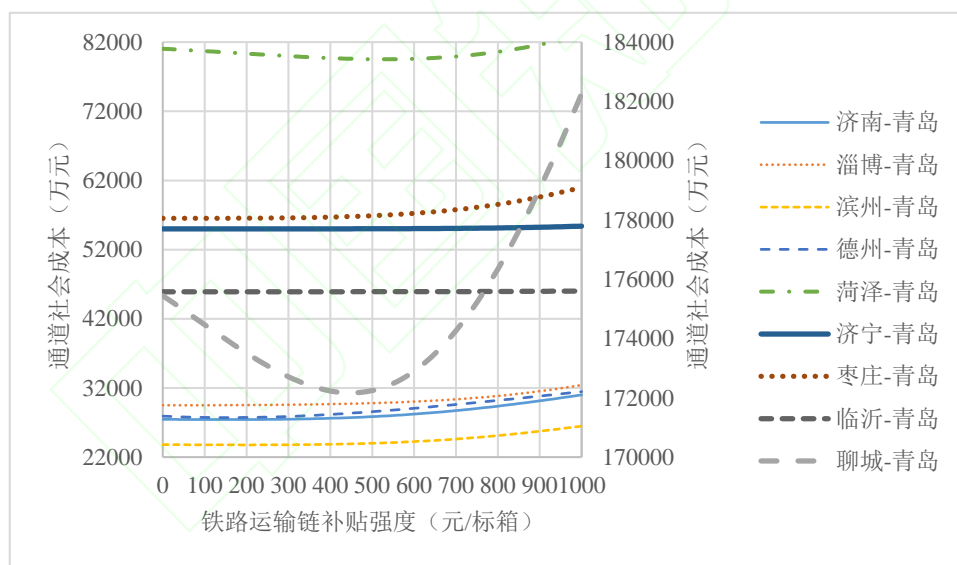


图 3 各通道在不同补贴强度下的社会成本变化

Fig.3 Social cost variation of each corridor under different subsidy intensities

表 6 各通道不同补贴政策的社会成本评估

Table 6 Social cost evaluation for different subsidy policies across corridors

通道	无补贴情景		现有补贴政策		最优补贴政策	
	补贴强度 (元/标箱)	社会成本 (亿元)	补贴强度 (元/标箱)	社会成本 (亿元)	补贴强度 (元/标箱)	社会成本 (亿元)
济南-青岛	0	2.747	400	2.762	150	2.744
淄博-青岛	0	2.950	400	2.967	0	2.950

聊城-青岛	0	17.545	400	17.223	450	17.217
滨州-青岛	0	2.382	400	2.387	200	2.378
德州-青岛	0	2.793	400	2.818	160	2.773
菏泽-青岛	0	8.104	400	7.969	530	7.952
济宁-青岛	0	5.501	400	5.501	210	5.501
枣庄-青岛	0	5.654	400	5.671	80	5.653
临沂-青岛	0	4.592	400	4.592	150	4.592
合计		52.267		51.891		51.759

注：由表 3 可知九个通道公路运输链单位距离运费最低为 5.28 元/标箱公里，而九个城市两两间距离均在 100 公里以上，这表明一个标箱在不同通道间的转运费至少要在 530 元以上，即并不会因为上表中未超过 530 元/标箱的铁路运输链补贴强度而导致运量在不同通道间发生转运。

4 结论

本研究提出基于社会成本最低的货运补贴政策评估框架，将社会成本分析（涵盖外部成本、运输成本、时间成本和补贴）与托运人选择行为模拟相结合，建立了“补贴强度→运输结构→社会成本”的量化传导路径，有助于评估补贴政策有效性，并能求解社会成本最低的最优补贴政策。主要结论如下：

（1）青岛港九个货运通道的实证分析表明，当前相同的补贴政策未能实现社会成本最优，存在优化空间。在现有相同补贴强度情况下，仅聊城-青岛、菏泽-青岛两个通道的社会成本有所下降，九条通道的社会总成本从无补贴情景的 52.267 亿元降至现有补贴政策的 51.891 亿元。这表明现有补贴政策仅实现了局部有效，对部分通道存在补贴过度或无效的问题。为提升政策精准性，建议在省级或港口城市群层面建立跨行政区的补贴协调机制，由交通、财政、发改等多部门联合制定差异化补贴方案，以降低因属地分割带来的行政协调成本；同时，可考虑设定年度补贴预算上限并引入绩效挂钩机制，将各通道实际政策效果纳入资金分配依据，避免财政资源浪费，并通过政策宣讲和试点示范增强托运人对差异化补贴的接受度。

（2）研究提出的个性化最优补贴政策能够实现比现有补贴政策更低的社会总成本。通过逐一优化，研究得出各通道的最优补贴政策（如聊城-青岛通道 450 元/标箱，菏泽-青岛通道 530 元/标箱，淄博-青岛通道不补贴等）。在最优补贴政策下，九个通道的社会总成本可进一步从现有补贴政策的 51.891 亿元降至 51.759 亿元，补贴总额可从现有补贴政策的 1.266 亿元降至 1.229 亿元。为保障个性化补贴政策的可持续实施，亟需构建基于实时数据的动态调整机制。定期采集不同运输方式信息，监测各通道货流变化与社会成本变动，自动触发补贴标准的校准；同时，可考虑设立“政策适应性评估窗口”，允许托运人在新补贴方案实施初期提出反馈，结合实际响应行为微调参数，从而增强政策韧性并降低执行阻力。

本研究仍存在一定局限。第一，外部成本测算部分参数依赖估算，存在一定不确定性，且生成的是全国均值，难以反映区域差异。第二，模型假设托运人行为同质，未充分考虑托运人偏好差异。第三，分析基于静态框架，尚未纳入政策实施后可能引发的运价调整、市场策略变化等动态反馈。未来可结合更精细的区域数据与动态建模方法进行完善。

参考文献

- [1] 吴云强, 解乔雅, 张戎. 集装箱海铁联运补贴优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 35-45. [WU Y, XIE Q, ZHANG R. Optimization of subsidies for container sea-rail intermodal transportation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024,

- 24(1): 35-45.]
- [2] 唐继孟, 李建, 阳波. 补贴政策对集装箱公铁联运竞争力的影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 201-208. [TANG J, LI J, YANG B. Impact of subsidy policy on the competitiveness of container rail-road intermodal transport [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 201-208.]
- [3] TAO X, WU Q, ZHU L. Mitigation potential of CO₂ emissions from modal shift induced by subsidy in hinterland container transport [J]. Energy Policy, 2017, 101: 265-273.
- [4] ZHU L. Effectiveness evaluation of freight subsidy policy from a broader clean production view – Case study of the Yiwu-Ningbo container freight corridor, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127720.
- [5] XIE C, WANG R, WANG D, et al. Incorporating revenue loss and congestion cost into rail freight subsidy design: Lessons learned from the China-Europe freight transportation network [J]. Transport Policy, 2025, 174: 103819.
- [6] 买媛媛, 王殿雷, 谢驰, 田春林. 面向多模式集装箱货运网络的中欧班列补贴方案分析与优化[J]. 交通运输研究, 2025, 11(1): 1-15. [MAI Y, WANG D, XIE C, et al. Analysis and optimization of subsidy scheme for China Europe Express in multi-mode container freight network [J]. Transport Research, 2025, 11(1): 1-15.]
- [7] WANG M, LI Z, JIANG L, et al. Combined China-Europe Railway Express and maritime transport with subsidy and emission tax considerations [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 204: 104421.
- [8] 简文良, 闫婷婷. 考虑时间价值差异的港口群海铁联运协同补贴策略[J/OL]. 交通运输工程与信息学报, 2026. [JIAN W, YAN T. Collaborative subsidy for sea-rail intermodal transportation of port group considering value of time difference [J/OL]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2026.]
- [9] 付建飞. 交通运输业外部成本计算方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2008, (8): 14-16. [FU J. Research on the calculation method of external costs in the transportation industry [J]. Railway Transport and Economy, 2008, (8): 14-16.]
- [10] TIAN L, YE Q, ZHEN Z. A new assessment model of social cost of carbon and its situation analysis in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 1434-1443.
- [11] 郑波, 李魁梅, 杨黎霞. 基于货物价值特性的运输适宜性评价模型及应用[J]. 科技通报, 2017, 33(12): 246-249. [ZHENG B, LI K, YANG L. Transport suitability evaluation model based on the characteristics of cargo value and its application [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(12): 246-249.]
- [12] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [<Second National Assessment Report on Climate Change> editorial committee. Second National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [13] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南[M]. 国家温室气体清单计划编写, 2006. [IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Programme for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.]
- [14] 邸晶. 中国交通运输系统外部成本计算理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. [DI J. Research on the calculation theory and method of the external cost of the transportation system in China [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.]