

文章编号: 1001-4632 (2026) 03-0252-10

引用格式: 刘昭然, 诸立超. 港口多腹地协同补贴的集装箱“公转铁”成效研究[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(3): 252-261.

Citation: LIU Zhaoran, ZHU Lichao. Effects of Coordinated Subsidies on Container Modal Shift from Road to Rail in Port Multi-Hinterland [J]. China Railway Science, 2026, 47 (3): 252-261.

港口多腹地协同补贴的集装箱“公转铁”成效研究

刘昭然^{1,2}, 诸立超³

- (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. 浙江财经大学 管理学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 补贴策略是各地政府推动运输结构调整的重要政策手段之一。针对港口城市虽对短距离腹地集装箱铁路运输采用统一补贴标准, 但未能结合各腹地特点实施差异化补贴的问题, 基于离散选择模型构建 1 种针对多通道的协同补贴模型。该模型允许补贴资金在港口多个腹地之间重新分配, 从而实现公路运输链周转量最小化, 并将模型应用于青岛港 9 个典型出口集装箱腹地。结果表明: 在单一政府补贴来源下, 相比无补贴情景, 单独补贴和协同补贴策略可使公路运输链周转量分别降低 16.87% 和 17.91%; 在政府与铁路多方补贴来源下, 相比无补贴情景, 单独补贴和协同补贴策略可使公路运输链周转量分别降低 25.18% 和 26.36%; 补贴策略对运输结构调整具有积极作用, 协同补贴策略对集装箱“公转铁”的优化效应明显。从降低公路运输链周转量的效率角度看, 补贴应优先分配给运输距离较长、铁路运输链运量基础较好的腹地。

关键词: 集装箱“公转铁”; 补贴策略; 协同补贴; 运输结构调整; 情景模拟

中图分类号: F512.4 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.03.22

2025 年, 中国港口货物吞吐量达 183.4 亿 t, 集装箱吞吐量达 3.5 亿标箱, 2 项指标均连续多年稳居世界第 1。在这一庞大的运输体系中, 港口与内陆腹地的集装箱集疏运主要依赖公路、铁路和水路 3 种方式。内陆段运输是港口综合竞争力的重要方面, 对港口产业发展具有至关重要的作用。然而, 当前公路运输因灵活性高、基础设施覆盖广, 在内陆运输中的占比长期居高不下, 导致拥堵和污染等问题突出。以青岛港为例, 在山东省政府补贴和济南局集团费率优惠政策支持下, 2025 年海铁联运集装箱量提升至 282.9 万标箱, 连续 11 年位居全国第 1, 但公路运输仍然承担了主要的集疏运任务。然而, 公路运输的碳排放强度分别是铁路和水路运输的 7.6 倍和 10.3 倍^[1], 这一现象不利于我国低碳目标的实现。因此, 推动公路运量向铁路和水路转移, 不仅是优化港口集疏运结构、降低全

社会物流成本的必然选择^[2], 也是实现交通行业碳达峰和碳中和的重要路径^[3]。

优化运输结构可采用对铁路或水路予以补贴^[4]、提高铁路或水路运营效率^[5]、外部成本内部化^[6]等措施。其中, 补贴可降低铁路或水路运价, 而外部成本内部化则会抬高公路运价, 二者本质上均通过增强铁路或水路的低价优势而提升其竞争力^[7]。由于我国公路运输企业利润率普遍较低、税费负担能力弱, 补贴相对于收费或征税更为简便易行, 社会接受度较高, 且有利于降低全社会物流成本, 因而被各级政府广泛采用。

在补贴或征税对运输结构的定量影响方面, 既有研究一般聚焦货运通道, 也有少量研究关注货运网络。就单一或少量货运通道而言, 由于涉及的参数较少, 一般通过构建离散选择模型识别托运人偏好^[8], 进而模拟不同定价策略或补贴方案的实施

收稿日期: 2025-11-25; 修订日期: 2026-05-27

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目 (22FJYB027); 国家自然科学基金资助项目 (72574138)

第一作者: 刘昭然 (1989—), 男, 吉林榆树人, 副研究员, 博士研究生。E-mail: zhaoranliu@126.com

通讯作者: 诸立超 (1989—), 男, 浙江杭州人, 副教授, 博士。E-mail: zhulichao@zufe.edu.cn

效果,也有部分学者通过博弈模型探究不同补贴方式和补贴定价机制的适用范围^[9]。针对珠三角地区多式联运的最优补贴研究表明,140元·标箱⁻¹的固定费率和0.076元·(标箱·km)⁻¹的变动费率,能够使其市场份额由19.36%提升至35.35%^[10]。在现有低水平碳交易价格下,铁路货运补贴是优化运输结构的主导因素。对于上海—重庆通道,10%的补贴率即可实现运输成本、时间和碳排放的综合最优^[11];对于义乌—宁波出口集装箱内陆段货运通道,200元·标箱⁻¹的铁路运输链补贴,能够使铁路运输链分担率提升3.20%^[12],对货主的激励作用更为显著,可使其选择铁路运输链的概率提升4.17%,对货代而言这一概率为2.08%^[13]。相较于上海—杭州等短途商品车公路运输,同等幅度的燃油价格上涨,更易推动上海—乌鲁木齐等长途商品车公路运输转向铁路运输^[14]。相比于单一货运通道,货运网络涉及的参数较多,通常在对诸多参数进行合理的假设简化前提下,采用基于(广义)费用最小化或有限资源约束下的全有全无优化模型,分别针对国内运输^[15]与国际运输^[16]确定最优的定价策略或补贴方案,并验证了差异化补贴方案相较于同质化补贴方案更具经济性^[17]。

综上,既有研究聚焦于单一通道补贴策略的定量影响,对多通道补贴关注不足,通常按照统一标准进行补贴,不利于充分发挥补贴对运输结构的优化效应。即便部分研究针对多通道补贴方案,也多以公路运输链(周转)量或外部成本最低为目标,但对不同运输链间的运量转换采用“全有全无”假设,难以体现托运人的实际选择偏好。此外,客货运偏好均会随时空发生变化^[18-19],这导致同一补贴政策的有效性在不同区域存在差异^[20]。其中,运输链是指货物在起止城市间整合运输、中转、存储等环节的完整路径^[21]。为此,本文基于离散选择模型构建1种多通道协同补贴模型,不仅能够有效揭示宏观层面运输链周转量与微观层面托运人选择偏好间的定量关系,还可在考虑各运输方式能力约束的前提下,确定使多通道公路运输链周转量最小化的补贴分配方案,进而提高补贴政策的实施有效性。在此基础上,将该模型应用于青岛港9个代表性出口集装箱腹地,在补贴总额不变的情况下优化补贴方案,以期最大程度降低公路运输链周转量。

1 模型构建

1.1 补贴策略

针对铁路或水路运输链的补贴,其核心作用是在特定货运通道的其他条件不变时,通过补贴降低铁路或水路运输链费用,促使部分托运人由公路运输链转向铁路或水路运输链,进而降低公路运输链周转量,具体可分为独立补贴和协同补贴2种策略。独立补贴策略是指名义上给予通道 f 的补贴,实际上只能补贴给该通道的铁路或水路运输链,这意味着不同通道的补贴额不可互相调剂。通过独立补贴模型,可针对每个通道计算不同补贴方案下各运输链的货运量及各通道的铁路或水路运输链补贴额,进而核算各通道公路运输链周转量(各通道公路货运量与运距的乘积),通过加总可得所有通道的公路运输链周转量。协同补贴策略是指名义上给予通道 f 的铁路或水路运输链补贴,实际上可统筹用于案例涉及所有通道的铁路或水路运输链,最优协同补贴方案由协同补贴模型计算得出。该模型允许补贴总额在相关通道的铁路或水路运输链间进行重新分配,目标是使这些通道的公路运输链周转量最低。

为比较2种策略在降低公路运输链周转量方面的有效性,需保证补贴总额保持不变。2种模型对应的相关变量定义如下: f 为通道编号,取值为1, 2, ..., F ; i 和 j 为运输链类型索引,取值为 r_1 , r_2 和 w 时分别表示公路、铁路和水路运输链; $V_{f,i}$ 为通道 f 运输链 i 的可观测效应; $x_{f,i,k}$ 为通道 f 运输链 i 第 k 个变量值; $x_{f,i,c}$ 为通道 f 运输链 i 的成本; $\beta_{f,k}$ 为通道 f 第 k 个变量的待估计参数,用于表征决策权重; $A_{f,i}$ 为运输链 i 的待估计常数项; s_{f,r_2} 和 $s_{f,w}$ 分别为通道 f 铁路和水路运输链的当前补贴强度; v_f 为通道 f 的集装箱年运量; $p_{f,i}$ 为通道 f 运输链 i 的当前市场份额; w 为标箱平均货重; $e_{f,i}$ 为通道 f 运输链 i 的碳排放强度; $D_{f,i}$ 为通道 f 运输链 i 的平均运距; $L_{f,i}$ 为通道 f 运输链 i 的集装箱运量上限; $\beta_{f,c}$ 为通道 f 托运人的费用(补贴)偏好参数; S 为相关通道铁路和水路运输链补贴总额; $\dot{S}(z)$ 为第 z 种补贴分配方案, $z=1, 2, \dots, Z$; s_{z,f,r_2} 为通道 f 铁路运输链补贴额为 S_{z,f,r_2} 时该运输链的补贴强度; $s_{z,f,w}$ 为通道 f 水路运输链补贴额为 $S_{z,f,w}$ 时该运输链的补贴强度; $p_{z,f,i}$ 为通道 f 运输链 i 市场份额,受 s_{z,f,r_2} 和 $s_{z,f,w}$ 影响; $v_{z,f,i}$ 为第 z 种补贴分配方案下通道 f 运输链 i 的集装箱运量,可表示为第 z 种补贴分配方案 $\dot{S}(z)$

的函数,并受到通道 f 运输链 i 的最大运能约束; $T(z)$ 为第 z 种补贴分配方案下相关通道公路运输链周转量总和; $\Delta T(z)$ 为第 z 种补贴分配方案相比于无补贴方案的相关通道公路运输链周转量总和减少量; $T_h(z^*)$ 和 $T_{h+1}(z^*)$ 分别为第 h 次和第 $h+1$ 次迭代所得最优补贴分配方案对应的公路运输链周转量。

1.2 独立补贴模型

当其他条件不变时,补贴会降低铁路或水路运输链的成本,增加托运人选择铁路或水路运输链的概率。独立补贴模型的核心目标为在铁路或水路运输链不同补贴强度或补贴额度下,针对每个通道独立量化各运输链的货运量和周转量。通道 f 运输链 i 的市场份额 $p_{f,i}$ 为

$$p_{f,i} = \frac{e^{V_{f,i}}}{\sum_j e^{V_{f,j}}} \quad (1)$$

可观测效用 $V_{f,i}$ 通常为线性加和形式,考虑运输链时间和费用,研究者也可根据需要增加其他因素。当通道 f 运输链 i 的补贴强度为 $s_{f,i}$ 时,该运输链补贴后的成本 $\dot{x}_{f,i,c}$ 为

$$\dot{x}_{f,i,c} = x_{f,i,c} - s_{f,i} \quad (2)$$

此时,可观测效用 $V_{f,i}$ 为

$$V_{f,i} = \sum_{k=1, k \neq c}^{K_{f,i}} \beta_{f,k} x_{f,i,k} + \beta_{f,c} (x_{f,i,c} - s_{f,i}) + A_{f,i} \quad (3)$$

当参数 $\beta_{f,k}$ 为固定值时,所得模型为多项logit (Multinomial Logit, MNL)模型;当参数 $\beta_{f,k}$ 服从特定分布时,所得模型为混合logit (Mixed Logit, ML)模型。综上,可得运输链补贴强度与可观测效用以及可观测效用与运输链市场份额的定量关系。由此,在确定运输链补贴强度后,依托独立补贴模型计算通道 f 运输链 i 的货运量 $v_{f,i}$ 和周转量 $t_{f,i}$ 分别为

$$v_{f,i} = v_f p_{f,i} \quad (4)$$

$$t_{f,i} = v_{f,i} D_{f,i} \quad (5)$$

据此,进一步计算通道 f 补贴额 S_f 和所有通道补贴额 S 为

$$S_f = v_{f,r_2} s_{f,r_2} + v_{f,w} s_{f,w} \quad (6)$$

$$S = \sum_f S_f \quad (7)$$

上述内容基于补贴强度计算补贴额,然而,当 S_f 固定时,可依次根据式(6)、式(4)和式(1),将运输链 i 的货运量 $v_{f,i}$ 转换成补贴强度 $s_{f,i}$,进而根据数值算法(可利用MATLAB软件编程求解)得

到铁路或水路运输链的补贴强度、市场份额、对应的货运量和周转量。

在式(1)一式(7)中,除式(3)的参数 $\beta_{f,k}$ 和 $A_{f,i}$ 外,其余变量均为已知量。其中,补贴强度 $s_{f,i}$ 或补贴额 S_f 可由政府根据需要调整。为估计参数 $\beta_{f,k}$ 和 $A_{f,i}$,可采用揭示偏好 (Revealed Preference, RP) 数据、陈述偏好 (Stated Preference, SP) 数据或二者融合的混合数据。由于涉及多通道场景,且能通过实地调研掌握各通道不同运输链的平均时间、费用和年货运量等RP数据;同时,考虑到多通道SP数据调查时间跨度较长、成本较高,因此采用RP数据开展参数估计。进而得到所有通道公路、铁路和水路运输链年货运量最大公约数 E 。假设,通道A的年货运量为4 600标箱,其中公路、铁路和水路运输链的年货运量分别为1 000, 2 000和1 600标箱;通道B的年货运量为2 400标箱,其中公路、铁路和水路运输链的年货运量分别为800, 600和1 000标箱。此时, E 取值为200,以该数值作为换算基准时,通道A可折算得到23个样本,对应公路、铁路和水路运输链的样本数量分别为5, 10和8个;类似的,通道B的年货运量可转换为12个样本,对应公路、铁路和水路运输链的样本数量分别为4, 3和5个。实际分析中取 E 为250标箱作为换算基准,按照上述折算规则,得到样本。样本中各运输链的时间与费用变量,采用实地调研获取的均值表征。最终,将上述样本数据导入NLOGIT软件,即可完成离散选择模型中参数 $\beta_{f,k}$ 与常数项 $A_{f,i}$ 的估计。

1.3 协同补贴模型

协同补贴模型以最小化所有通道公路运输链周转量 $T(z)$ 为目标,其目标函数 Z' 为

$$Z' = \min T(z) = \min \sum_f v_{z,f,r} D_{f,r} \quad (8)$$

其约束条件为所有通道的补贴总额不变,该约束的表达式为

$$\dot{S}(z) = [S_{z,1,r_2}, S_{z,1,w}, S_{z,2,r_2}, S_{z,2,w}, \dots, S_{z,F,r_2}, S_{z,F,w}]^T \quad (9)$$

$$S = \sum_{f=1}^F (S_{z,f,r_2} + S_{z,f,w}) \quad (10)$$

在此基础上,采用协同补贴分配算法求解最优补贴分配方案,算法流程如图1所示。具体步骤如下。

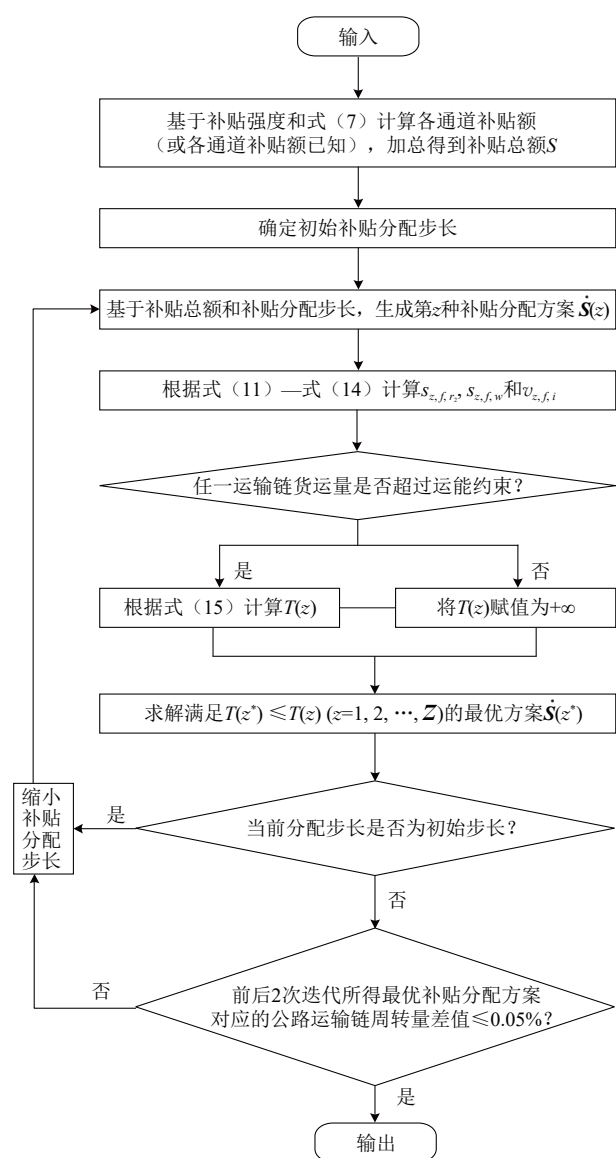


图1 协同补贴分配算法流程

步骤1: 根据式(7)计算各通道在当前铁路或水路运输链补贴强度下的补贴额。当政府或相关部门根据财政预算确定补贴额时, 补贴额为直接给定。

步骤2: 确定初始补贴分配步长, 确保所有可能的补贴分配方案数量在合理范围内, 从而能在较短时间内计算得到最优补贴分配方案。

步骤3: 在相关通道补贴总额固定的情况下, 将补贴总额以特定补贴分配步长重新分配至各通道的铁路和水路运输链, 共生成Z种补贴方案。以包含A, B 2个货运通道的场景为例, 设补贴额为10 000元, 补贴分配步长为1 000元。此时, 第1种补贴分配方案为0元(通道A)+10 000元(通道B), 第2种补贴分配方案为1 000元(通道

A)+9 000元(通道B), 第3种补贴分配方案为2 000元(通道A)+8 000元(通道B), 其他方案依此类推, 共11种补贴分配方案。

步骤4: 对于第z种补贴分配方案, 根据1.2节所述方法计算通道f中各运输链的补贴强度和货运量。具体而言, 使用数值算法计算通道f中铁路运输链的补贴强度 s_{z,f,r_2} 和水路运输链的补贴强度 $s_{z,f,w}$ 分别为

$$s_{z,f,r_2} = \frac{S_{z,f,r_2}}{p_{z,f,r_2} v_f} \quad (11)$$

$$s_{z,f,w} = \frac{S_{z,f,w}}{p_{z,f,w} v_f} \quad (12)$$

为降低计算成本, 选取可准确反映样本均值特性的典型样本对上述公式中的 $p_{z,f,i}$ 进行拟合。由式(1)可得式(11)和式(12)中的 $p_{z,f,i}$ 可表示为

$$p_{z,f,i} = \frac{\exp(V_{f,i})}{\exp(V_{f,r}) + \exp(V_{f,r_2} + \beta_{f,c} s_{z,f,r_2}) + \exp(V_{f,i})} \quad (13)$$

进而计算第z种补贴分配方案下通道f运输链i的运量 $v_{z,f,i}$ 为

$$v_{z,f,i} = p_{z,f,i} v_f \quad (14)$$

步骤5: 计算相关通道在第z种补贴分配方案下的公路运输链周转量 $T(z)$ 。在第z种补贴分配方案下, 若任一运输链的货运量超过其运能约束, 相应 $T(z)$ 被自动分配为 $+\infty$, 以此来反映该补贴分配方案的不可行; 否则, 公路运输链周转量 $T(z)$ 的计算式为

$$T(z) = \sum_f v_{z,f,r} D_{f,r} \quad (15)$$

步骤6: 通过遍历所有可行补贴分配方案, 计算各方案对应的公路运输链周转量 $T(z)$, 并识别使 $T(z)$ 最小化的最优补贴分配方案 $S^*(z^*)$, 其对应的公路运输链周转量为 $T(z^*)$; 同时, 分别获得通道f铁路(补贴额为 S_{z^*,f,r_2})及水路运输链(补贴额为 $S_{z^*,f,w}$)的补贴强度 s_{z^*,f,r_2} 和 $s_{z^*,f,w}$ 。

步骤7: 若补贴分配步长为初始步长, 则执行步骤8; 若否, 则执行步骤9。

步骤8: 缩小补贴分配步长, 通常取上一次迭代步长的1/2或1/3, 然后返回步骤3。

步骤9: 理论上补贴分配步长可以无限缩小, 为平衡求解精度和计算效率, 在迭代过程中逐步缩小补贴分配步长。若满足 $|(T_{h+1}(z^*) - T_h(z^*))|$

$T_h(z^*)| \leq 0.05\%$ ，则流程结束，并将第 $h+1$ 次迭代所得补贴分配方案 $\dot{S}(z^*)$ 视为最优方案进行输出；否则，返回步骤 8。

综上，所提协同补贴分配算法，以固定总额约束下的公路运输链周转量最小化为目标，求解各通道的最优补贴分配方案。若需进一步提升解的精度，可将收敛阈值由 0.05% 收紧至 0.01% ，但计算时长也会急剧增加。需要说明的是，相关通道补贴总额与分配步长可能存在非整除关系，导致少量补贴额未被分配。为简化处理，这些剩余补贴额可直接分配给算法识别的补贴额最高的通道。此外，协同补贴模型的目标函数可根据研究目的进行调整，如能耗排放最低^[22]或社会福利最大^[23]等。

2 案例简介

所提协同补贴模型适用于不同地区的集装箱和非集装箱货运通道，但不同案例参数存在差异，为使研究结果更具现实意义，基于协同补贴政策的可行性和必要性，选取青岛港 9 个具有代表性的出口集装箱腹地作为研究对象，包括济南、淄博、聊城、滨州、德州、菏泽、济宁、枣庄和临沂。

在可行性方面，青岛港出口集装箱货源大部分来自山东省，并且这 9 个腹地均通过公路或铁路运输链运抵青岛港出口，运输距离介于 200~700 km 之间，此范围内这 2 类运输链具有竞争关系^[24]。

更重要的是，这些腹地的铁路运输链已获得专项政府补贴，同时享受铁路运价与装卸费下浮政策，为协同补贴机制的落地实施提供了现实支撑。在必要性方面，现有补贴与费用优惠政策虽提高了铁路运输链在这些腹地的市场份额，但公路运输链仍占据主导地位^[25]。同时，由于山东省的经济总量持续位居全国前 3，相较于欠发达地区，其在优化运输结构、确保发展公平性方面负有更大责任。

通过在 2024 年 11 月对青岛港和相关腹地铁路货运部门的管理人员、货主和货代等相关利益主体进行访谈调研，获取各腹地公路和铁路运输链的时间均值、费用均值和年运量等数据，2 类运输链现状见表 2 和表 3。其中，表 3 所列铁路运输链费用均值为考虑政府补贴和铁路运价、装卸费下浮后托运人实际承担的费用。

表 2 青岛港出口集装箱腹地公路运输链现状

腹地名称	时间均值/ h	费用均值/ (元·标箱 ⁻¹)	年运量/标箱	平均运距/ km
济南	12	2 350	60 000	322
淄博	11	1 935	100 000	253
聊城	14	3 205	250 000	431
滨州	10	2 235	60 000	312
德州	15	3 490	10 000	441
菏泽	17	2 605	150 000	493
济宁	15	2 405	150 000	384
枣庄	14	2 305	150 000	356
临沂	12	2 205	150 000	239

表 3 青岛港出口集装箱腹地铁路运输链现状

腹地名称	时间均值/ h	政府补贴/ (元·标箱 ⁻¹)	内陆车站装卸费 下浮/(元·标箱 ⁻¹)	空重联运运价 下浮/(元·标箱 ⁻¹)	港口车站装卸费 下浮/(元·标箱 ⁻¹)	费用均值/ (元·标箱 ⁻¹)	年运量/ 标箱	平均运距/ km
济南	19.0	400	0	877	125	1 679	22 500	364
淄博	19.5	400	0	1 050	0	1 464	6 000	271
聊城	17.0	400	72	2 010	58	2 333	150 000	517
滨州	19.5	400	117	1 174	41	1 455	15 800	308
德州	15.0	400	195	1 801	195	2 565	57 000	438
菏泽	21.0	400	98	1 457	110	1 738	50 000	633
济宁	20.5	400	98	1 225	110	1 815	1 000	501
枣庄	19.5	400	98	1 095	110	1 783	14 000	485
临沂	17.0	400	98	413	110	1 501	230	312

注：铁路运输距离取腹地各铁路发送站至青岛港黄岛站的平均里程，两端公路短驳距离统一按 20 km 计。

3 协同补贴策略仿真分析

3.1 参数估计

以 250 个标箱为基本单位，将表 2 和表 3 统计数据转换为选择行为样本数据，并利用 NLOGIT

软件估计 MNL 模型和 ML 模型，参数估计结果见表 4。由表 4 可知：2 个模型运输链时间和费用的参数估计值正负号均符合预期，即某条运输链的时间越长、费用越高，其运量越低；2 个模型的精度均超过了 0.2，表明模型能够较好地揭示腹地运输

表 4 离散选择模型参数估计结果

变量名称	MNL 模型		ML 模型	
	参数估计值	显著性水平	参数估计值	显著性水平
运输链时间	-1.692×10^{-1}	<0.001	-6.738×10^{-1}	<0.001
运输链费用	-5.580×10^{-3}	<0.001	-3.460×10^{-3}	<0.001
对数似然比	-3.871×10^3		-3.871×10^3	
极大似然值	-2.526×10^3		-2.522×10^3	
模型精度	3.480×10^{-1}		3.490×10^{-1}	

注：ML 模型中，运输链时间和费用参数均服从三角分布，表中数值为该分布的均值估计值。

结构的变化规律。为确保随机参数取值范围不包含 0，此处将 ML 模型的随机参数定义为服从三角分布，并将三角分布的均值和跨度比值设定为 1。该处理方式使得 MNL 模型和 ML 模型的待估计参数数量相同，此时可直接比较 2 个模型的精度，而不用借助似然比和信息准则指标进行判断。通过比较可知，ML 模型的精度高于 MNL 模型，后续使用 ML 模型模拟不同补贴强度和补贴策略的公路运输链周转量。

3.2 单一补贴源的协同补贴策略模拟

仅考虑政府对铁路运输链补贴的情况下，结合表 3、表 4 数据及 $400 \text{ 元} \cdot \text{标箱}^{-1}$ 的补贴强度，测算 9 个腹地补贴前的公路和铁路运输链运量。本例中政府对铁路运输链的补贴总额为 12 661.2 万元，针对 9 个腹地，采用协同补贴模型，以 2 100 万元为初始补贴分配步长进行迭代，并逐步将补贴分配步长缩小至 700，350 和 180 万元。由于补贴分配步长为 350 和 180 万元所得目标值（补贴情景下的公路运输链周转量）与初始目标值（无补贴情景下的公路运输链周转量）比例差异小于 0.05%，故迭代过程停止，不再缩小补贴分配步长，并将补贴分配步长为 180 万元的协同补贴方案作为最终结果输出。单一补贴源下最优协同补贴策略的 4 次迭代结果如图 2 所示。

由于 4 次迭代结果的解读过程类似，此处聚焦第 1 次迭代（步长 2 100 万元）和第 4 次迭代（步长 180 万元）。由图 2 可知：在步长为 2 100 万元情况下，聊城、菏泽和枣庄 3 个腹地的铁路运输链分别补贴 6 300，4 200 和 2 100 万元，补贴强度分别为 411，565 和 669 $\text{元} \cdot \text{标箱}^{-1}$ ，其余 6 个腹地的补贴额和补贴强度接近于 0，9 个腹地的公路运输链周转量共计 39 426 万标箱 $\cdot \text{km}$ 。上述结果表明，对聊城、菏泽和枣庄 3 个腹地铁路运输链的最优补贴额范围分别为 $[4\ 200, 8\ 400]$ ， $[2\ 100, 6\ 300]$ 和 $[0, 4\ 200]$ 万元，其余 6 个腹地铁路运输链的

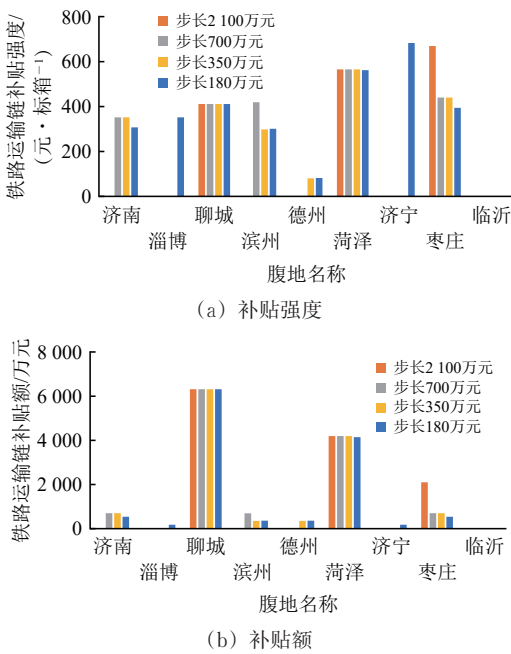


图 2 单一补贴源下最优协同补贴策略的 4 次迭代结果

最优补贴额范围为 $[0, 2\ 100]$ 万元。在此基础上，将补贴分配步长进一步缩小至 700，350 和 180 万元进行迭代。无补贴情景下 9 个腹地的公路运输链周转量为 47 675 万标箱 $\cdot \text{km}$ ，当补贴分配步长分别为 2 100，700，350 和 180 万元时，最优协同补贴分配方案对应的公路运输链周转量相应减少至 39 426，39 194，39 151 和 39 134 万标箱 $\cdot \text{km}$ ，呈现出随补贴分配步长同步下降的趋势。

为便于比较，表 5 展示了无补贴、单独补贴策略和协同补贴策略（补贴分配步长 180 万元）的对比结果。由表 5 可知，相比于无补贴，单独补贴策略和协同补贴策略分别使 9 个腹地的公路运输链周转量降低 16.87% 和 17.91%。表明补贴策略对运输结构调整起到了积极的促进作用。在本例中，协同补贴策略优化运输结构的比例并不十分显著，主要原因在于，在当前的单独补贴策略中，聊城、菏泽和枣庄 3 个腹地的铁路运输链补贴总额占 9 个腹

地补贴总额的67.61%，对运输结构调整贡献最大的这3个腹地已经被分配了大部分补贴。即便在协同补贴策略中进一步增加对这3个腹地的补贴额，由于公路运输链周转量的减少呈边际递减趋势，其变化幅度有限。对上述3地分配更多补贴额的原因，可归结为其在9个腹地中货运量排名分别为第

1、第2和第3，铁路市场份额排名分别为第2、第3和第6，运距排名分别为第1、第2和第5。较高的货运量，意味着相同的铁路运输链补贴强度能够吸引更多的公路运输链运量转移；较长的运距，表明转移1个标箱能使公路运输链周转量有更大幅度的下降。

表5 单一补贴源不同补贴策略对比

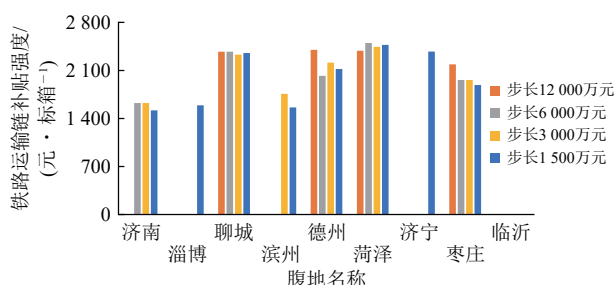
腹地名称	货运量/标箱	铁路运输链平均运距/km	无补贴		单独补贴策略		协同补贴策略	
			铁路补贴强度/(元·标箱 ⁻¹)	铁路市场份额/%	铁路补贴强度/(元·标箱 ⁻¹)	铁路市场份额/%	铁路补贴强度/(元·标箱 ⁻¹)	铁路市场份额/%
济南	82 500	364	0	8.59	400	27.27	0	8.59
淄博	106 000	271	0	1.48	400	5.66	0	1.48
聊城	400 000	517	0	13.07	400	37.50	411	38.40
滨州	75 800	308	0	6.19	400	20.84	0	6.19
德州	67 000	438	0	58.82	400	85.08	0	58.82
菏泽	200 000	633	0	7.71	400	25.00	565	37.11
济宁	151 000	501	0	0.17	400	0.66	0	0.17
枣庄	164 000	485	0	2.29	400	8.54	669	19.14
临沂	150 230	312	0	0.04	400	0.15	0	0.04
公路运输链周转量/(万标箱·km)			47 675		39 630		39 135	
铁路运输链周转量/(万标箱·km)			6 007		15 564		16 307	
公路运输链周转量减少量/(万标箱·km)					8 045		8 273	

注：受公、铁运距差异影响，同一腹地2类运输链的周转量增减幅度不相等。

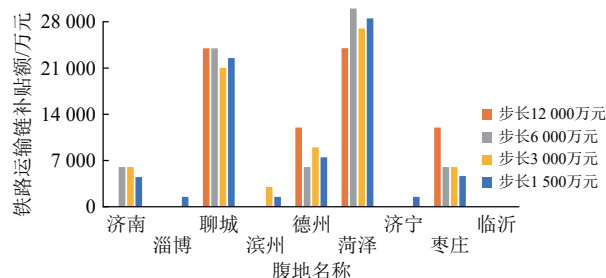
3.3 多个补贴源的协同补贴策略模拟

3.2节仅考虑政府单一补贴源，本节进一步考虑表3中铁路部门为吸引货源而实施的运价和装卸费下浮。政府补贴为12 661.2万元，铁路运价和装卸费下浮额度为59 876.4万元，共计72 537.6万元。由于多个补贴源与单一补贴源的协同补贴策略迭代过程类似，此处仅聚焦模拟结果。与图2的迭代收敛逻辑一致，计算得到补贴分配步长分别为12 000、6 000、3 000和1 500万元时的协同补贴分配方案，如图3所示。

由于最后2次补贴分配步长所得目标值与初始目标值比例差异小于0.05%，无须继续缩小补贴分配步长，并将步长为1 500万元的协同补贴分配方案作为最终输出结果。为便于比较，表6同步列出无补贴、单独补贴策略和最优协同补贴策略（步长1 500万元）3种情景的结果。由表6可知：相比于无补贴，单独补贴策略和协同补贴策略分别使9个腹地的公路运输链周转量降低了25.18%和26.36%，表明补贴策略对运输结构调整起到了积极的促进作用，特别是协同补贴策略；与单一政府补贴侧重提高聊城、菏泽、枣庄3地铁路运输链补贴强度不同，在多个补贴源最优协同补贴策略中，



(a) 补贴强度



(b) 补贴额

图3 多个补贴源下最优协同补贴策略的4次迭代结果

聊城—青岛通道铁路运输链补贴强度（政府补贴+铁路价格下浮）需适度下调，但整体来看聊城、菏泽和枣庄的铁路运输链补贴额在9个腹地中仍然位居第2、第1和第4，表明补贴应优先分配给9个腹地中运输距离较长、铁路运输链潜力较高的腹地。

表 6 多个补贴源不同补贴策略的结果对比

腹地名称	货运量/ 标箱	铁路运输链 平均运距/km	无补贴		单独补贴策略		协同补贴策略	
			铁路补贴强度/ (元·标箱 ⁻¹)	铁路市场 份额/%	铁路补贴强度/ (元·标箱 ⁻¹)	铁路市场 份额/%	铁路补贴强度/ (元·标箱 ⁻¹)	铁路市场 份额/%
济南	82 500	364	0	0.29	1 402	27.27	1 518	35.91
淄博	106 000	271	0	0.04	1 450	5.66	1 591	8.90
聊城	400 000	517	0	0.01	2 540	37.50	2 353	23.91
滨州	75 800	308	0	0.07	1 732	20.84	1 560	12.68
德州	67 000	438	0	0.07	2 591	85.08	2 120	52.77
菏泽	200 000	633	0	0.03	2 065	25.00	2 472	57.68
济宁	151 000	501	0	0.00	1 832	0.66	2 375	4.18
枣庄	164 000	485	0	0.03	1 702	8.54	1 887	15.04
临沂	150 230	312	0	0.00	1 020	0.15	0	0.00
公路运输链周转量/(万标箱·km)			52 967		39 630		39 004	
铁路运输链周转量/(万标箱·km)			21		15 564		16 902	
公路运输链周转量减少/(万标箱·km)					13 337		13 963	

注：受公、铁运距差异影响，同一腹地 2 类运输链的周转量增减幅度不相等。

总体而言，多补贴源最优协同补贴策略仅需对大多数腹地的铁路运输链补贴强度做小幅调整，即可实现 9 个腹地的公路运输链周转量进一步下降 1 338 万标箱·km。

4 结 语

为进一步提升补贴策略对运输结构调整的优化效果，本文基于离散选择模型构建了考虑运能约束的协同补贴模型，旨在对特定地区多通道的补贴进行协同分配，从而实现公路运输链周转量的最小化，形成更具成本效益的政策干预方案。基于青岛港 9 个出口集装箱腹地的实证分析表明，协同补贴策略展现出显著的优化效应：仅考虑政府单一补贴源时，公路运输链周转量较无补贴情景下降 17.91%，降幅优于单独补贴策略的 16.87%；同时考虑政府和铁路部门多个补贴源时，协同补贴策

略下的降幅可达 26.36%，同样优于单独补贴策略的 25.18%，证实协同补贴策略对运输结构进一步优化的积极作用。从降低公路运输链周转量的效率角度看，补贴应优先分配给运输距离较长、铁路运输链运量基础较好的腹地。以聊城—青岛、菏泽—青岛、枣庄—青岛等通道为例，其运距为 431~633 km，货运量为 15~40 万标箱，市场份额为 7.71%~37.50%，3 个指标均处于较高水平，在协同补贴策略中获得了更大比例的补贴，从而使公路运输链周转量的降幅更加显著。

该协同补贴模型，不仅适用于青岛港案例，也适用于其他集装箱及非集装箱货运通道的补贴优化设计。后续研究可从 2 个方面拓展：一是引入更多的运输链选择行为影响因素，提升对运输费用决策权重的揭示精度；二是提升协同补贴分配算法的计算效率，从而制定更高效、准确的协同补贴方案。

参 考 文 献

[1] 田佩宁,毛保华,童瑞咏,等.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, 2023,19(3):347-356.
(TIAN Peining, MAO Baohua, TONG Ruiyong, et al. Analysis of Carbon Emission Level and Intensity of China's Transportation Industry and Different Transportation Modes [J]. Climate Change Research, 2023, 19 (3): 347-356. in Chinese)

[2] 倪玲霖,李亚男,杨磊.考虑起讫空间自相关的卷钢铁路运输需求影响因素挖掘与空间效应分析[J].中国铁道科学, 2025,46(5):214-224.
(NI Linglin, LI Yanan, YANG Lei. The Influencing Factors Exploration and Spatial Effect Analysis on the Coil Steel Railway Transportation Demand Considering the Origin-Destination Spatial Autocorrelation [J]. China Railway Science,

- 2025, 46 (5): 214-224. in Chinese)
- [3] ZHU L C, ZHEN W. Uncovering Freight Corridors' Embodied CO₂ Responsibilities: Evidence from the Yiwu-Ningbo Corridor, China [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2023, 17 (6): 660-678.
- [4] ZHU L C. 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] KAACK L H, VAISHNAV P, MORGAN M G, et al. Decarbonizing Intraregional Freight Systems with a Focus on Modal Shift [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13 (8): 083001.
- [6] ZHONG H L, CHEN W H, GU Y M. A System Dynamics Model of Port Hinterland Intermodal Transport: a Case Study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under Different Carbon Taxation Policies [J]. Research in Transportation Business & Management, 2023, 49: 100987.
- [7] 刘昭然, 诸立超. 我国货运结构调整的理论认识和实践难点[J]. 铁道货运, 2024, 42(8): 8-14.
(LIU Zhaoran, ZHU Lichao. Theoretical Understanding and Practical Difficulties of Freight Structure Adjustment in China [J]. Railway Freight Transport, 2024, 42 (8): 8-14. in Chinese)
- [8] TAO X Z, ZHU L C. What is the Optimal Subsidy Scheme for Multiple Port-Hinterland Corridors with a Given Subsidy Budget? [J]. Research in Transportation Business & Management, 2025, 61: 101412.
- [9] 徐菱, 徐瞳, 江文辉, 等. 基于货主偏好的中欧班列定价与补贴机制研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 2-9.
(XU Ling, XU Tong, JIANG Wenhui, et al. Pricing and Subsidizing Mechanism of China Railway Express Considering Shipper's Preference [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23 (1): 2-9. in Chinese)
- [10] HU Q L, GU W H, WANG S A. Optimal Subsidy Scheme Design for Promoting Intermodal Freight Transport [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 157: 102561.
- [11] YIN C Z, ZHANG Z A, FU X W, et al. A Low-Carbon Transportation Network: Collaborative Effects of a Rail Freight Subsidy and Carbon Trading Mechanism [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 184: 104066.
- [12] TAO X Z, WU Q, ZHU L C. Mitigation Potential of CO₂ Emissions from Modal Shift Induced by Subsidy in Hinterland Container Transport [J]. Energy Policy, 2017, 101: 265-273.
- [13] 张戎, 诸立超, 耿一飞. 融合感知差异的货代和货主选择行为异质性揭示[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 11-19.
(ZHANG Rong, ZHU Lichao, GENG Yifei. Revelation of Choice Behavior Heterogeneity of Freight Forwarder and Shipper Incorporating Perception Difference [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40 (5): 11-19. in Chinese)
- [14] 申嘉琪, 刘浩, 张戎. 公路商品车运价测算及考虑燃油价格变动的铁路竞争力分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 47-54.
(SHEN Jiaqi, LIU Hao, ZHANG Rong. Measurement of Road Automobile Transport Price and Analysis of Rail Competitiveness Considering Fuel Price Changes [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23 (4): 47-54. in Chinese)
- [15] 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 Yunqiang, XIE Qiaoya, ZHANG Rong. Optimization of Subsidies for Container Sea-Rail Intermodal Transportation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24 (1): 35-45. in Chinese)
- [16] XIE C, WANG R S, WANG D L, 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.
- [17] 朱宇婷, 余明月, 杨扬, 等. “公转铁”政策背景下考虑经济和环境效益的铁路差异化补贴决策研究[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(1): 80-89.
(ZHU Yuting, YU Mingyue, YANG Yang, et al. Decision-Making on Differentiated Railway Subsidies Considering Economic and Environmental Benefits in the Context of the “Road to Rail” Policy [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49 (1): 80-89. in Chinese)
- [18] 诸立超, 刘昭然. 托运人在不同时空下的选择行为差异揭示[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(1): 27-32.
(ZHU Lichao, LIU Zhaoran. Revealing Difference of Shippers' Choice Behavior under Different Spatio-Temporal Conditions [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20 (1): 27-32. in Chinese)
- [19] 孙国锋, 景云, 李和璧, 等. 基于旅客多维出行需求的列车开行方案与票价联合优化方法[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(6): 224-235.
(SUN Guofeng, JING Yun, LI Hebi, et al. Joint Optimization Method of Train Line Planning and Ticket Pricing Based on Multi-Dimensional Travel Demand of Passengers [J]. China Railway Science, 2024, 45 (6): 224-235. in Chinese)
- [20] LI J C, JIANG M R, LI G. Does the New Energy Vehicles Subsidy Policy Decrease the Carbon Emissions of the Urban Transport Industry? Evidence from Chinese Cities in Yangtze River Delta [J]. Energy, 2024, 298: 131322.

- [21] 诸立超,甄伟,刘昭然.生命周期视角下货运通道能耗测度与节能潜力分析[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(1):24-29. (ZHU Lichao, ZHEN Wei, LIU Zhaoran. Energy Consumption Measurement and Energy-Saving Potential Analysis of Freight Corridors from Perspective of Life Cycle [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22 (1): 24-29. in Chinese)
- [22] MARTÍNEZ-MOYA J, FEO-VALERO M, VEGA A. Policy-Mix to Decarbonise Transport: Emission Trading System and Subsidies on Short-Sea-Shipping Demand [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2025, 149: 105042.
- [23] WANG M R, LI Z C, JIANG L J, 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.
- [24] 项昀,王伟,郑敦勇,等.区域综合网络货运交通方式的优势运距研究[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(6):33-39. (XIANG Yun, WANG Wei, ZHENG Dunyong, et al. Dominant Transportation Distance for Multi Transportation Modes in Regional Integrated Freight Network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16 (6): 33-39. in Chinese)
- [25] GANJI S S, TIRKOLAE E B. Intercity Road Transportation Assessment: Double-Frontier Q-Cross-Efficiency Method [J]. Transport Policy, 2025, 167: 42-65.

Effects of Coordinated Subsidies on Container Modal Shift from Road to Rail in Port Multi-Hinterland

LIU Zhaoran^{1, 2}, ZHU Lichao³

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Comprehensive Transportation, Academy of Macroeconomic Research, Beijing 100038, China;

3. School of Management, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Subsidy strategy serves as one of the critical instruments for regional governments to promote transportation structure adjustment. Though uniform subsidy standards are applied by port cities to container railway transportation in short-distance hinterlands, they fail to implement differentiated subsidies tailored to the unique characteristics of each hinterland. Therefore, a multi-channel coordinated subsidy model based on a discrete choice model is constructed. The model enables the reallocation of subsidy funds across multiple port hinterlands to minimize the turnover volume of road transportation chains, and it is applied to 9 representative export container hinterlands of Qingdao Port. The results demonstrate that under a single subsidy source of government, compared to a non-subsidy scenario, standalone and coordinated subsidy strategies reduce the turnover volume of road transportation chain by 16.87% and 17.91%, respectively. Under multi-subsidy sources of government and railway, compared to the non-subsidy scenario, standalone and coordinated subsidy strategies reduce the turnover volume of road transportation chain by 25.18% and 26.36%, respectively. The subsidy strategies play positive role in transportation structure adjustment, and the coordinated subsidy strategies show obvious optimization effects on container modal shift from road to rail. From the perspective of improving efficiency by reducing road transport chain turnover volume, subsidies should be preferentially allocated to hinterlands with longer transport distances and a solid foundation in railway transport chain volume.

Key words: Container modal shift from road to rail; Subsidy strategy; Coordinated subsidy; Transportation structure adjustment; Scenario simulation

(责任编辑 杨婧婕)