Modeling and Simulation 建模与仿真, 2025, 14(1), 557-571
Published Online January 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2025.141052

Hans汉斯

低碳视角下公铁联运最后一公里配送路径优化研究

季凌慧[1,2]，姚　佼[1,2*]，张　聪[1,2]，王可澈[3]，黄海璇[3]

[1]上海理工大学管理学院，上海
[2]上海理工大学智慧城市交通研究院　上海
[3]上海铁路监督管理局，上海

收稿日期：2024年12月16日；录用日期：2025年1月9日；发布日期：2025年1月16日

摘　要

针对公铁联运“最后一公里”配送中存在碳排放量和总成本过高等问题。从低碳视角出发，根据运输方式不同，分别构建低碳视角下公铁联运正向配送路径优化模型和正逆向结合路径优化模型，前者包含公铁运输成本及其碳排放成本、铁路物流中心发车成本等相关成本，后者在前者包含的成本上增加了逆向铁路运输成本及碳排放成本。然后，阐述了两个模型的区别。最后通过禁忌搜索算法对其进行求解。相关的案例分析结果显示；在总成本方面，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式总成本的费用节省率为41.03%；在碳排放成本方面，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式碳排放总成本的费用节省率为41.41%；在碳排放成本中公路运输碳排放成本占比最大，因此，通过提高车辆装载率，可以降低运输里程，从而达到降低公路运输成本的目的。研究为进一步优化公铁联运“最后一公里”配送服务提供参考。

关键词

公铁联运，路径优化，低碳视角，禁忌搜索算法，逆向物流

Optimization of the Last Kilometer Distribution Route of Rail-Road Intermodal Transportation from the Perspective of Low Carbon

Linghui Ji[1,2], Jiao Yao[1,2*], Cong Zhang[1,2], Kewei Wang[3], Haixuan Huang[3]

[1]Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

[*]通讯作者。

文章引用: 季凌慧, 姚佼, 张聪, 王可澈, 黄海璇. 低碳视角下公铁联运最后一公里配送路径优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 557-571. DOI: 10.12677/mos.2025.141052

[2]Smart Urban Mobility Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
[3]Shanghai Railway Administration, Shanghai

Received: Dec. 16th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 16th, 2025

Abstract

Aiming at the problems of high carbon emission and total cost in the "last kilometer" distribution of rail-road intermodal transportation. From the perspective of low-carbon, according to different modes of transportation, the forward distribution path optimization model and the forward and reverse combination path optimization model of public and railway intermodal transport are respectively constructed from the perspective of low-carbon. The former includes the transport cost and carbon emission cost of public and railway logistics center, and the latter adds the reverse railway transport cost and carbon emission cost to the cost contained in the former. Finally, it is solved by tabu search algorithm. The results of relevant case studies show that; In terms of total cost, the cost saving rate of combined forward and reverse transport mode is 41.70% compared with that of single forward and reverse transport mode. In terms of carbon emission cost, the cost-saving rate of combined forward and reverse transport mode is 41.41% compared with the total carbon emission cost of single forward and reverse transport mode. In the carbon emission cost. Therefore, under the background of the country's vigorous development of green and low-carbon, the road transport process should be optimized as much as possible. In terms of other costs, to achieve the purpose of reducing the road transportation cost. The results of this study provide a reference for further optimizing the "last kilometer" distribution service of rail-road intermodal transportation.

Keywords

Rail-Road Intermodal Transportation, Path Optimization, Low-Carbon Perspective, Tabu Search Algorithm, Reverse Logistics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着经济蓬勃发展，顾客对货物运输的时效性和经济性提出了更高要求。物流企业通过选择合理的运输方式和路径，不仅可以降低运输成本，还可以减少碳排放量，保障货物及时送达到客户手中[1]。在我国“双碳”背景下进行“公转铁”式结构调整，结合逆向物流，充分发挥公路运输和铁路运输各自优势，公铁联运朝着绿色、安全、集约方向发展成为必然趋势[2]。另一方面，公铁联运真正实现互通相联的解决方法之一是优化铁路尽头的公路“最后一公里”配送方式，合理的配送路径不仅降低物流成本也可以降低温室气体排放。

低碳背景下公铁联运“最后一公里配送”问题一直是路径优化系统中研究的热点和难点。徐剑等[3]重点考虑公铁联运中转节点中的仓储成本，并且结合多种约束限制，比如送达时间限制、班期限制等构建运输总成本模型。李欣雅等[4]把众多集装箱公铁联运文献归结到五个模块中，并在环境目标模块中细分为碳税法、碳交易法和多目标优化法，较为详细地汇总了现阶段集装箱公铁联运路径优化相关文献。李玉民等[5]创新性地提出“高速公路 + 高速铁路”的配送方式，结合生鲜农产品特点和模糊需求理论，

认为该配送方式可以适用于小批量配送模式，并且在模型中重点考虑时间满意度与运输成本的关系，结合生鲜农产品特点以客户时间满意度为主要目标构建模型，最后将“高速公路 + 高速铁路”的配送方式和其他运输方式进行对比，突出本文配送当时的优越性。LI [6]对 MVRP 进行研究，并提出一个 MVRP 数学模型。利用提出的改进遗传算法结合其独特的分而治之的策略，验证了该模型的可行性和合理性。SUN 等[7]采用模糊目标规划方法对绿色公铁联运网络问题进行研究，提高了线路选择的可靠性。MAJBAH 等[8]认为多式联运中的运输设备特别容易受到自然灾害或者人为破坏等因素地影响。针对这一问题，提出一种可靠的多式联运运输路径模型。通过墨西哥湾沿岸一个真实的联运网络进行了演示，证明了模型的有效性。SUN 等[9]首先建立双目标模糊混合整数非线性规划模型，最后对该精确值采用多目标算法进行求解。王祺等[10]结合冷链运输低碳要求，在车辆制冷成本中考虑到因为开关车门造成的车厢制冷系统能耗问题，引入制冷成本计算公式准确的计算碳排放成本。设计出改进－大规模邻域搜索算法求解出配送路线。实验表明，该模型及算法在需求不明时，多配送中心的冷链配送模式总成本更低。秦进等[11]为了提高电商系统拣选效率，以最小化机器人负载距离为目标，构建订单分配与路径规划联合优化模型，该模型计算结果显示，当订单数量增长时，相比 CPLEX 具有突出时间优势。LIU 等[12]认为在工业 4.0 背景下，物流配送路线存在不合理现象，构建单一配送中心为起点的配送项目优先级分组和配送路径综合模型，采用混合进化算法求解模型，确定最佳路线。黄俊生[13]等以最大限度地降低顾客和公司运营成本为目标，构建了最佳列车开行方案模型，通过改进的邻域搜索算法进行求解。结果显示全网系统成本降低了接近 4.0%，并且换乘行为减少。

综上，“公转铁”可以有效降低能源消耗和排放，实现“双碳”的国家战略，特别是优化铁路尽头的公路“最后一公里”配送作用就显得尤为突出，公铁联运“最后一公里”配送结合与逆向物流有机结合，直接关系整个社会的物流效率和碳排放的大局。基于此，本文针对低碳公铁联运“最后一公里”配送问题，构建正向配送路径优化模型、逆向回收路径优化模型和正逆向结合路径优化模型，通过禁忌搜索算法对其进行求解。并以沪宁线为例，进行相应的实证分析。

2. 正向配送路径优化模型构建

2.1. 问题描述及条件假设

(1) 问题描述

正向配送路径优化模型问题描述与传统配送路径优化模型问题描述相似。在整个正向配送路径优化模型系统中主要是根据客户需求量和位置，针对公铁联运中的公路“最后一公里”配送环节进行分析。铁路周边分布多个铁路物流中心，在已知铁路物流中心位置的前提下，每个铁路物流中心服务的客户区域构成一个配送分区，按区配送。

首先，货物从铁路始发站，经铁路运输到各铁路物流中心，铁路物流中心对货物进行集散处理；其次，处理后的货物被分配到相应配送车辆；最后，铁路物流中心根据客户位置和需求量派出配送车辆进行公路“最后一公里”配送服务，完成整个低碳公铁联运多个铁路物流中心“最后一公里”配送服务。

本文研究的是多铁路物流中心按区配送低碳公铁联运“最后一公里”公路配送问题，可以描述为在公铁联运系统内，1 个铁路始发站 r，I 个铁路物流中心 i，J 个客户 j，K 辆配送车 k。

(2) 条件假设

a) 铁路物流中心数量和位置已经确定，铁路物流中心与客户之间对应关系已经确定。

b) 本节重点优化公路配送环节。

c) 每个铁路物流中心配送车辆充足，配送车辆完成配送任务后返回该铁路物流中心。

d) 客户点需求量和位置信息已知。

2.2. 正向配送路径优化成本分析模型

(1) 从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本

在整个公铁联运系统中，货物首先会从铁路始发站经过铁路运输，运输到每个铁路物流中心。因此，整个路径优化系统中需要对从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本进行分析，其用铁路运输单价、距离和货物量来衡量。具体表现为：

$$C_1' = \sum_{i \in I} E_a d_{ri}' Q_{ri}' \tag{2.1}$$

其中，E_a 表示铁路运输单价；d_{ri}' 表示正向运输中铁路始发站到铁路物流中心的距离；Q_{ri}' 表示正向运输中铁路始发站到铁路物流中心的运输量。

(2) 从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本

公铁联运运输过程中产生的碳排放成本与传统配送不同之处在于，不仅要考虑公路配送过程中碳排放成本，还要考虑铁路运输过程中产生的碳排放成本。参考文献[14]使用碳排放强度方法，具体而言铁路正向运输过程中产生的碳排放成本。具体表现为：

$$C_2' = \alpha U_s \sum_{i \in I} d_{ri}' Q_{ri}' \tag{2.2}$$

其中，α 表示碳税税率，U_s 表示铁路运输的碳排放强度。

(3) 正向公路配送成本

公路配送阶段是本节要重点优化的内容。其包括节点之间所有运输成本。比如，铁路物流中心到客户的运输成本，上游客户到下游客户的运输成本，客户到铁路物流中心的运输成本。为了统一运输过程，本文用节点 i 和 j 表示铁路物流中心和客户。正向公路配送成本用公路配送距离与公路配送单价来衡量。具体表现为：

$$C_3' = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{ij}' E_b x_{ij}'^k \tag{2.3}$$

其中，d_{ij}' 表示正向运输中铁路物流中心和客户之间的公路配送距离；E_b 表示正向运输中公路配送的单位配送成本。$x_{ij}'^k$ 表示正向运输中从铁路物流中心出发的车辆是否由 i 点运输到 j 点，如果是则为 1，不是为 0。

(4) 正向公路配送碳排放成本

公路配送过程中产生的碳排放成本用碳税税率、公路配送的碳排放强度、公路配送距离与公路运输货物量来衡量。具体可以表示为：

$$C_4' = \alpha U_g \sum_{i \in I} d_{ij}' x_{ij}'^k \tag{2.4}$$

其中，U_g 表示公路运输的碳排放强度。

(5) 正向铁路物流中心发车成本

当确定铁路物流中心位置和数量之后，派出合适数量车辆进行配送。发车成本是指为了满足周边客户需求从铁路物流中心出发进行配送的车辆产生的成本。主要包括配送车辆的折旧成本、司机工资、车辆维修费和保险费用，本文用 C_c 表示每辆车的发车成本，则总发车成本具体表现为：

$$C_5' = \sum_{i \in I} C_c x_i'^k \tag{2.5}$$

其中，$x_i'^k$ 表示正向运输中铁路物流中心的车辆 k 是否被使用。如果是则为 1，否则为 0。

(6) 正向公路配送时间窗惩罚成本

在公路配送过程中，客户十分关心是否能按时收到货物。常用时间窗的类型主要有硬时间窗和软时间窗。混合时间窗是前两种时间窗的结合。本文参考文献[5]采用混合时间窗，计算惩罚成本。如图 1 所示，如果车辆在$[EET, ET]$内到达，则产生一定的惩罚成本，这个惩罚成本呈现线性相关。同理如果在$[LT, LLT]$内到达也会产生线性相关惩罚成本；如果在$[ET, LT]$最佳时间窗内到达则不会产生任何成本；如果在其他时间窗内到达则会产生无穷大的成本。

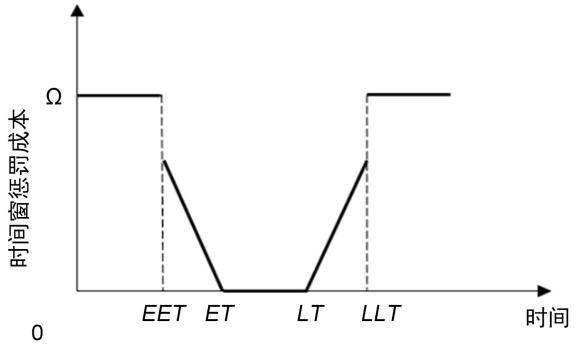

Figure 1. Relationship between the mixed time window and the time window penalty cost
图 1. 混合时间窗与时间窗惩罚成本关系

从实际角度出发本文，选择混合时间窗来衡量时间窗惩罚成本。车辆在最佳服务时间的范围外，到达客户点则会根据早到或者晚到的时间计算时间窗惩罚成本，时间窗惩罚成本用C_6'表示。C_l表示在可接受的服务时间内早到或迟到的单位时间惩罚成本。

$$f\left(T_j^{'k}\right)=\begin{cases}\Omega, & T_j'^k < EET \text{或} T_j'^k > LLT \\ \left(ET - T_j'^k\right), & EET \le T_j'^k < ET \\ T_j'^k - LT, & LT < T_j'^k < LLT \\ 0, & ET < T_j'^k < LT\end{cases} \quad ,\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \tag{2.6}$$

$$C_6^{'}=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} f\left(T_j'^k\right) C_l y_j'^k \tag{2.7}$$

式中，Ω 表示时间窗惩罚成本无穷大；$[ET, LT]$为最佳时间窗，在最佳时间窗内送货不会产生任何时间窗惩罚成本；$[EET, ET]$和$[LT, LLT]$为可接受时间窗，如果车辆在这个时间段到达客户点则会按照早到和晚到的时间产生时间惩罚成本。$T_j'^k$ 表示车辆 k 到达客户 j 的时间；$f\left(T_j'^k\right)$是正向运输中，车辆 k 到达 j 点，所需要的时间以及混合时间窗规则计算早到或迟到时间的函数值；$y_j'^k$ 表示正向运输中 j 点是否由铁路物流中心出发的车辆 k 进行服务，如果是则为 1，否则为 0。

2.3. 正向配送路径优化目标函数构建

在正向配送路径优化模型中，货物从铁路始发站通过铁路运输到铁路物流中心，然后再经公路配送送往客户手中，车辆路径问题主要研究从铁路物流中心到客户的配送路径优化问题，此时客户只有正向需求，综合考虑铁路运输成本、从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本、正向公路配送成本、正向公路配送碳排放成本、正向铁路物流中心发车成本以及正向公路配送时间窗惩罚成本，构建配送总成本最低的低碳公铁联运正向配送路径优化模型：

$$\min C'_d = C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4 + C'_5 + C'_6 = \sum_{i\in I} E_a d'_{ri} Q_{ri} + \alpha U_s \sum_{i\in I} d'_{ri} Q_{ri} + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} d'_{ri} E_b x'^{k}_{ij} + \alpha U_g \sum_{i\in I} d'_{ij} x'^{k}_{ij} + \sum_{i\in I} C_c x'^{k}_{i} + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} f\left(T'^{k}_{j}\right) C_l y'^{k}_{j} \tag{2.8}$$

约束条件：

$$Q'^{k}_{i} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} Q_a x'^{k}_{ij} \le Q_{\max}, \quad \forall k \in K \tag{2.9}$$

式(2.9)表示车辆 k 从铁路物流中心 i 出发时的载货量等于所服务的客户的送货需求量之和，并且小于等于车辆最大载货量。Q'^{k}_{i} 表示正向运输中车辆从铁路物流中心出发时刻载货量，Q_a 表示每个客户配送量，$Q_{\max}$ 表示车辆最大载重量。

$$\lambda'_j = \left(\lambda'_i + t'_i + t'_{ij}\right) x'^{k}_{ij} \tag{2.10}$$

式(2.10)表示到下一个客户的配送时间，等于到达上一个客户的时间，加上服务该客户时间加上，两个客户之间的行驶时间。其中，λ'_i 表示正向运输中到达点 i 的时刻，t'_i 表示正向运输中在节点 i 的服务时间，t'_{ij} 表示正向运输中从节点 i 到节点 j 的运输时间。λ'_j 表示正向运输中到达节点 j 的时刻。

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in I} x'^{k}_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \tag{2.11}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in J} x'^{k}_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \tag{2.12}$$

式(2.11)和(2.12)表示每个客户有且仅有一次被服务。

$$\sum_{i\in I} x'^{k}_{i} \le 1, \quad \forall k \in K \tag{2.13}$$

式(2.13)表示每辆车最多只能使用一次。

$$x'^{k}_{ij} \le y'^{k}_{j}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{2.14}$$

式(2.14)表示一辆车可以服务多个客户，而一个客户只能被一辆车服务。

3. 正逆向结合路径优化模型构建

3.1. 问题描述及条件假设

(1) 问题描述

正逆向结合低碳公铁联运路径优化模型中包含三个物流节点，分别是铁路始发站，铁路物流中心和客户。首先，货物从铁路始发站经过铁路运输，运输到各铁路物流中心，然后铁路物流中心对货物拆箱和重新分配，将货物装到配送车辆上进行下一步正逆向结合的公路配送兼顾回收环节。图 2 为正逆向结合低碳公铁联运路径优化拓扑结构图。

3.2. 正逆向结合路径优化成本分析模型

通过运输过程可知，正逆向结合路径优化模型共包含 8 个成本。

本节从路径优化涉及到的成本，对两种模式进行区分。

(1) 从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本

从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本，在正向和正逆向结合路径优化模型中，完全一致。

(2) 从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本

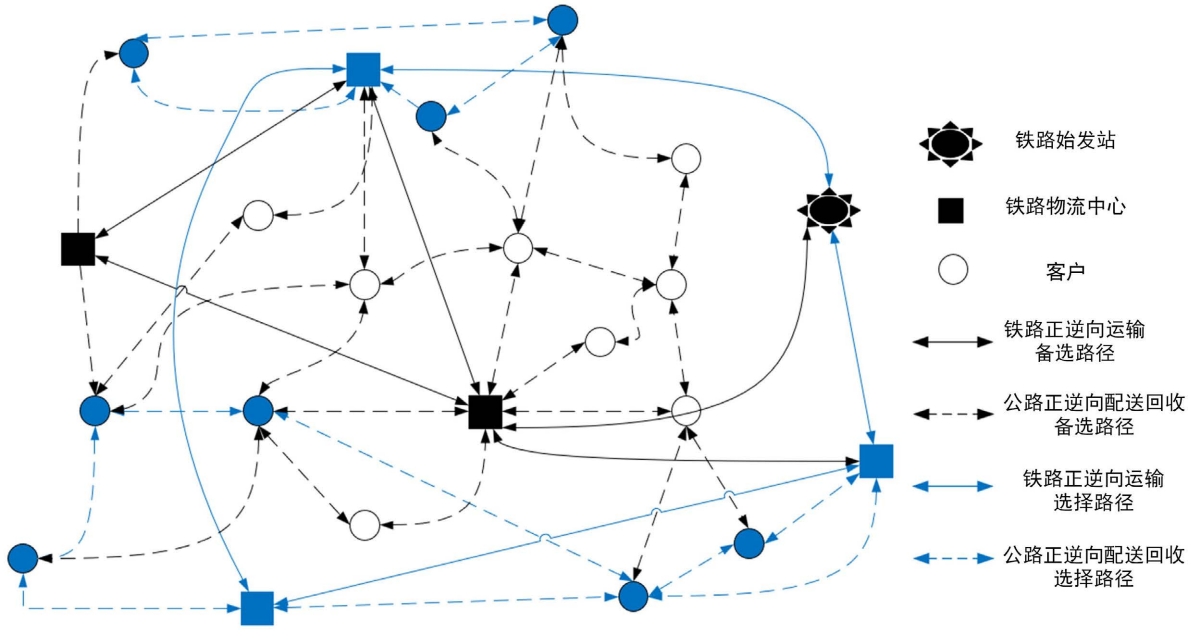

Figure 2. Topological structure diagram of low-carbon public rail combined with forward and reverse route optimization
图 2. 低碳公铁联运正逆向结合路径优化拓扑结构图

从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本，在正向和正逆向结合路径优化模型中，完全一致。

(3) 公路运输成本

相同点：模型计算公式一样。

不同点：正向模型中客户只有配送需求，正逆向结合模型中既有配送需求也有回收需求，当加入逆向回收需求后，因为车辆装载率的限制，车辆到达客户的时候，不仅要考虑卸货量还要考虑装货量，两者结合不能大于车辆最大装载量。这是影响车辆路径的原因之一。

(4) 公路运输碳排放成本

公路运输碳排放成本，在正向和正逆向结合路径优化模型中，完全一致。

(5) 铁路物流中心发车成本

相同点：模型计算公式一样。

不同点：由于正逆向结合物流中，加入了客户逆向需求，整个公路运输网络中，货物量比单独正向配送多。所以，最终派出车辆数，正逆向结合物流可能多于正向配送。

(6) 公路运输时间窗惩罚成本

相同点：模型计算公式一样。

不同点：正逆向结合物流中不仅考虑装货时间，还要考虑卸货时间。然而正向配送物流中，只考虑卸货时间。所以，在每个客户点服务时间不同，会影响到路径选择。

(7) 从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本

不同点：从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本为逆向铁路运输成本，所以只出现在正逆向结合物流模式中。而正向配送中没有这一成本。

(8) 从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本碳排放成本

不同点：从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本为逆向铁路运输产生的碳排放成本，所以只

出现在正逆向结合物流模式中。而正向配送中没有这一成本。

3.3. 正逆向结合路径优化目标函数构建

在正逆向结合低碳公铁联运路径优化模型中，客户既有正向需求也有逆向需求。配送品从铁路始发站、经铁路运输到铁路物流中心，再经公路运输送往客户手中的同时回收回流品，将回流品送到铁路物流中心，最后经铁路运输送往铁路始发站，在公路运输过程中，客户具备正逆向需求，即配送的同时也要进行回收。在充分考虑配送品和回流品特点的基础上，综合考虑，从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本、从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本、正逆向结合公路配送和回收成本、正逆向结合公路配送和回收成本碳排放成本、正逆向结合铁路物流中心发车成本、正逆向结合公路配送和回收时间窗惩罚成本、从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本以及从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本。构建总成本最低的低碳公铁联运正逆向结合路径优化模型。

$$\begin{aligned}\min C_d'' &= C_1'' + C_2'' + C_3'' + C_4'' + C_5'' + C_6'' + C_7'' + C_8'' \\ &= \sum_{i\in I} E_a d_{ri}'' Q_{ri}'' + \alpha U_s \sum_{i\in I} d_{ri}'' Q_{ri}'' + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} d_{ij}'' E_b x_{ij}''^k + \alpha U_g \sum_{m\in M} d_{ij}'' x_{ij}''^k \\ &+ \sum_{i\in I} C_c x_i''^k + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} f\left(T_i''^k\right) C_l y_j''^k + \sum_{i\in I} d_{ir}'' Q_{ir}'' E_a + \alpha U_s \sum_{i\in I} d_{ir}'' Q''\end{aligned} \tag{3.1}$$

约束条件：

$$Q_i''^k = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ij}''^k Q_a \le Q_{\max},\quad \forall k \in K \tag{3.2}$$

式(3.2)表示车辆 k 从铁路物流中心出发时的载货量等于所服务的客户的送货需求量之和，并且小于等于车辆最大载货量。$Q_i''^k$ 表示从铁路物流中心出发时刻载货量；Q_a 表示每个客户配送量。

$$0 \le Q_i''^k \le Q_{\max},\quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{3.3}$$

式(3.3)表示逆向回收过程约束，保证每辆车在任何路段上的负载都不得超过车辆的最大负载限制，且非负。其中 $Q_{ij}''^{mk}$ 表示正逆向结合运输中从铁路物流中心发出的车辆 k 访问完 i 后再访问 j 之前的载货量，其为连续变量。

$$Q_{\max} - Q_i''^k \ge Q_b \tag{3.4}$$

式(3.4)表示，当到下一个客户点时，即时的可用载货量大于客户的逆向需求量；Q_b 表示每个客户逆向需求量。

$$Q_i''^{ka} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} Q_b x_{ij}''^k,\quad \forall k \in K \tag{3.5}$$

式(3.5)表示保证车辆回到铁路物流中心的载货量为已服务的客户的取货需求量之和。其中 $Q_i''^{ka}$ 表示正逆向结合车辆 k 回到铁路物流中心的载货量。

$$\lambda_j'' = \left(\lambda_i'' + t_i'' + t_{ij}''\right) x_{ij}''^k \tag{3.6}$$

式(3.6)表示到下一个客户的配送时间，等于到达上一个客户的时间，加上服务该客户时间，加上两个客户之间的行驶时间。

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in I} x_{ij}''^k = 1,\quad \forall j \in V \tag{3.7}$$

$$\sum_{k\in I}\sum_{j\in J} x_{ij}'^k = 1,\quad \forall i \in V \tag{3.8}$$

式(3.7)和(3.8)表示每个客户有且仅有一次被服务。

$$\sum_{i\in I} x_i''^k \le 1, \quad \forall k \in K \tag{3.9}$$

式(3.9)表示每辆车最多只能使用一次。

$$x_{ij}''^k \le y_j''^k, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{3.10}$$

式(3.10)表示一辆车可以服务多个客户，而一个客户只能被一辆车服务。

4. 基于禁忌搜索算法的模型求解

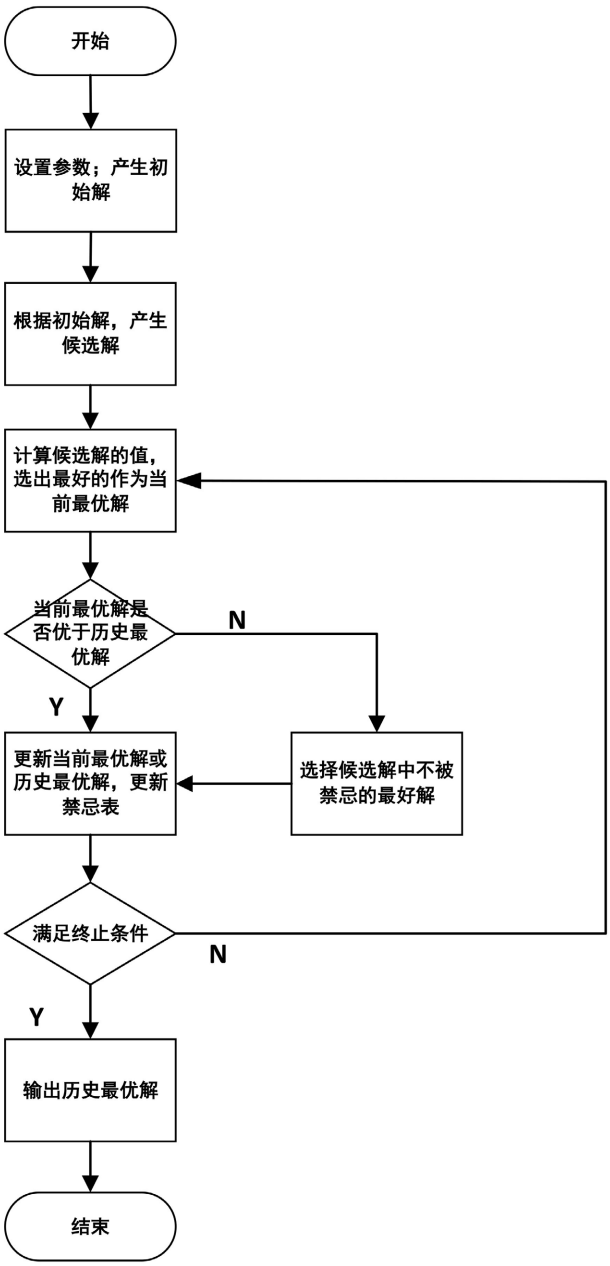

Figure 3. Tabu search algorithm flow chart
图 3. 禁忌搜索算法流程图

由模型可以看出，本文构建的选址模型属于 NP-hard 问题，经典的算法难以求得精确解，通常采用启发式算法求得满意解[15]。因此，本文采用禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)对模型进行求解。具体的算法流程如图 3 所示。

5. 案例分析

5.1. 案例基本数据

选取沪宁线上海南翔站附近一主要生产粮食等农副产品的工厂，现有一批农副产品需要从始发站南翔站运输到各需求点，需求点为沪宁线周边农副产品经销商。为节约成本，计划采用公铁联运运输方式进行运输，从众多铁路货运站中选出 10 个作为备选铁路物流中心，其中选择 B2 (昆山站)、B5 (戚墅堰站)和 B9 (龙潭站)作为选中的铁路物流中心服务周边顾客。图 4 为公铁联运选址分布图，主要反映当前沪宁线周边铁路物流中心及需求点分布情况，其中被绿色正方形圈起来的表示选中的铁路物流中心。

Figure 4. Location distribution map of combined transportation of public railways and railways
图 4. 公铁联运选址分布图

假设该工厂已提前把产品运输到始发站，上海南翔站(G1)其坐标为(121.309572, 31.28768)并且有足够的仓储空间，选中铁路物流中心相关信息如表 1 所示。

Table 1. Railway logistics center related information
表 1. 铁路物流中心相关信息

编号	经度	纬度	处理货物单位成本元/t	耗电量 MWh	耗油/kg	单位碳排放/kg
B2 (昆山站)	120.963465	31.372021	22	2534	109	2.14
B5 (戚墅堰站)	120.090935	31.717221	21	2212	163	5.34
B10 (兴卫村站)	118.864542	32.110101	22	1672	210	7.32

根据实地调研，已知需求点为分布在沪宁线周边的各大型商超。公铁联运选址布局图，如图 3 所示，其中蓝色正方形一共有 10 个表示 10 个备选铁路物流中心，红色三角形一共 46 个表示沪宁线周边 46 个大型零售门店的需求点。附件为 46 个零售门店的相关信息，以及各点之间的距离。

公路运输费用参考文献[14]为 0.466 元/t·km。

铁路运输费用基于《铁路货物运价规则》，可以表示为：

$$p_c=\left[p_a+p_b\cdot X_k\right]\times T_t \tag{5.1}$$

P_c 表示铁路运输运费；P_a 表示基价 1 (元/t)；P_b 表示基价 2 (元/t·km)；X_k 表示运费里程(km)；T_t 表示计费重量(t)。其中，采用 4 号运价，基价 1 为 9.3 元/吨，基价 2 为 0.0434 元/(t·Lm) [14]。

碳排放费用相关数据，参考文献[12]和[16]，具体如表 2 所示。

Table 2. Data related to carbon emission costs
表 2. 碳排放费用相关数据

项目类型	对应参数	数据
碳税税率	α	0.076 元/kg
铁路运输的碳排放强度	U_s	0.0077 kg/(t·km)
公路运输的碳排放强度	O_s	0.1691 kg/t·km
处理货物的单位碳排放量	S_j	0.156 kg/t

5.2. 方案结果分析

(1) 正向配送路径优化模型的案例结果分析

以 2.3 节正向配送路径优化模型为目标函数，6.1 节案例信息作为基础数据，在 MATLAB 上使用禁忌搜索算法求解。

根据计算结果得出下层公路配送部分应该派出 10 辆车进行配送，其中，B2 (昆山站)要派出 3 辆车进行配送；B5 (戚墅堰站)也要派出 3 辆车进行配送；B9 (龙潭站)要派出 4 辆车进行配送。

(2) 正逆向结合路径优化模型的案例结果分析

以 3.3 节正逆向结合路径优化模型为目标函数，6.1 节案例信息作为基础数据，在 MATLAB 上使用禁忌搜索算法求解。结果如图 5 所示。

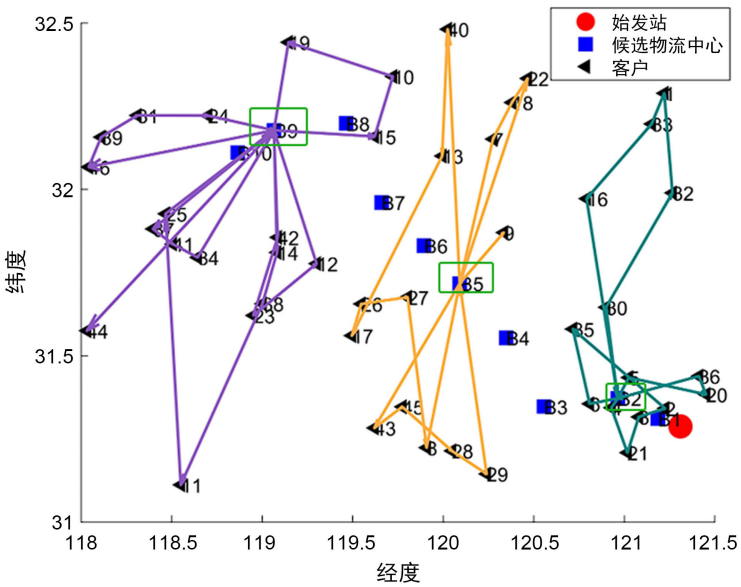

Figure 5. Scheme diagram of forward and backward combination path optimization model
图 5. 正逆向结合路径优化模型方案图

图 5 中，被绿色正方形线框，框起来的表示选中的铁路物流中心，由其派出车辆服务周边客户。根据计算结果得出正逆向结合公路配送和回收部分应该派出 13 辆车进行服务。

5.3. 数据对比分析

为解决公铁联运“最后一公里”配送，配送成本高、车辆装载率低等问题。本节针对其涉及到的相关成本，进行对比分析。通过 MATLAB 求解出，单独正向配送、单独逆向回收和正逆向结合配送和回收三种运输模式相关数据。其中，单独逆向回收运输模式，与单独正向配送运输模式相比，只是运输方式不同，其他都相同。为方便对比，本节以单独正向配送和单独逆向回收为一个单位(下文统称为单独正逆向运输模式)，正逆向结合运输为一个单位进行对比(下文统称为正逆向结合运输模式)。

(1) 总成本对比分析

Table 3. Comparison table of total transportation costs of single forward and reverse transportation and combined forward and reverse transportation
表 3. 单独正逆向和正逆向结合运输总成本对比表

编号	各项成本	单独正逆向/元	正逆向结合/元	费用节省率
1	从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本	3276.55	1750.49	46.58%
2	从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本	118.54	70.30	40.70%
3	铁路物流中心固定发车成本	6600.00	3900.00	40.91%
4	公路运输成本	36041.58	21519.20	40.29%
5	公路运输碳排放成本	3872.35	2267.16	41.45%
6	公路运输时间窗惩罚成本	688.29	509.24	26.01%
7	从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本	3276.55	1750.49	46.58%
8	从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本	118.54	70.30	40.70%
—	总成本	53992.41	31837.18	41.03%

根据表 3 可知，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式总成本的费用节省率为 41.03%，其中从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本和从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本费用节省率最高为 46.58%；公路运输时间窗惩罚成本费用节省了最低为 26.01%。原因在于，运输方式不同，正逆向结合运输模式在配送的过程中兼顾回收，而单独正逆向运输模式是先配送再回收。

(2) 碳排放成本对比分析

因为本文为低碳视角下公铁联运选址和路径优化研究，所以本节重点对碳排放成本进行分析。

Table 4. Comparison table of carbon emission costs of single forward and reverse transportation and combined forward and reverse transportation
表 4. 单独正逆向和正逆向结合运输碳排放成本对比表

编号	各项成本	正逆向结合/元	单独正逆向/元	费用节省率
1	从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本	118.54	70.3	40.70%
2	正向公路配送碳排放成本	3872.35	2267.16	41.45%
3	从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本	118.54	70.3	40.70%
—	总成本	4109.43	2407.76	41.41%

根据表 4 可知，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式碳排放总成本的费用节省率为 41.41%，其中正向公路配送碳排放成本费用节省率最高为 41.45%；从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本和从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本费用节省了最低为 40.70%。原因与总成本相同。

(3) 其他成本对比分析

由于公路运输成本，在总成本中占比最高，因此本节对其进行对比分析。表 5 为考虑正逆向路径优化的各项成本对比表。

Table 5. Cost comparison table considering forward and reverse path optimization
表 5. 考虑正逆向路径优化的各项成本对比表

各项成本	正逆向结合/元	单独正逆向/元	费用节省率
公路运输成本	36041.58	21519.20	40.29%

根据目标函数可知，公路运输成本由运输里程和运输单价决定。不同输运模式中公路运输单价为同一值，因此，本文从运输里程作为切入点探究其原因。

其次，根据 MATLAB 计算结果可知不同运输模式公路运输里程，其对比结果如表 6 所示。

Table 6. Comparison table of highway transportation mileage of different transportation modes
表 6. 不同运输模式公路运输里程对比表

对比项目	正向运输/km	逆向运输/km	正逆向结合/km	里程节省率
公路运输里程	2611.57	2674.44	3157.37	40.27%

里程节省率是指：正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式，节省的路程，在单独正逆向运输模式中的占比。其公式与费用节省率相似。

$$f_c = \frac{f_a - f_b}{f_a} \tag{5.2}$$

式子中，f_c 表示里程节省率，f_a 表示单独正逆向运输公路行驶里程，f_b 表示正逆向结合运输公路行驶里程。

为进一步探究，相同的正逆向需求下，运输里程不同的原因。本文结合 MATLAB 计算结果，给出了不同运输模式平均装载率对比结果，如表 7 所示。

其中，平均装载率是指：物流中心派出的车辆在整个配送过程中，车上货物和最大装载量的比值。

Table 7. Comparison table of average loading rate of different modes of transportation
表 7. 不同运输模式平均装载率对比表

对比项目	正向运输	逆向运输	正逆向结合
平均装载率	38.51%	39.85%	59.8%

从中可以看出，正向运输车辆平均装载率为 38.51%，逆向运输车辆平均装载率为 39.85%，二者平均装载率为 39.18%，远远低于正逆向结合运输模式中的平均装载率。因此，可以得出结论，造成不同运输里程差异的原因之一可能是车辆装载率。

6. 结论

首先，根据低碳公铁联运“最后一公里”正向配送涉及到的过程，构建了低碳公铁联运正向配送路径优化模型，其中可以分为公铁路径相关成本、物流中心相关成本和碳排放相关成本。

其次，根据低碳公铁联运“最后一公里”正逆向结合配送兼顾回收涉及到的过程，构建了正逆向结合路径优化模型。然后，阐述了两个模型的区别。再然后在 MATLAB 上运用禁忌搜索算法对其进行求解。

最后，以沪宁线周边铁路货运站改建铁路物流中心为背景进行算例分析，得出正向配送路径优化模型应该派出 10 辆车完成配送服务。正逆向结合路径优化模型应该派出 13 辆车完成配送兼顾回收服务。

在总成本方面，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式总成本的费用节省率为 41.03%；在碳排放成本方面，正逆向结合运输模式相比单独正逆向运输模式碳排放总成本的费用节省率为 41.41%；在碳排放成本中公路运输碳排放成本占比最大，因此，通过提高车辆装载率，可以降低运输里程，从而达到降低公路运输成本的目的，研究为进一步优化公铁联运“最后一公里”配送服务提供参考。

基金项目

教育部人文社会科学规划基金项目/MOE (Ministry of Education in China) Project of Humanities and Social Sciences (22YJAZH131)；教育部产学研协同育人项目(231104575133349)；上海理工大学研究生本研一体化课程建设项目(BY202404)；上海理工大学一流本科课程建设项目(YLKC202424373)。

参考文献

[1] 张振江, 张玉召, 王小荣. 模糊需求下快捷货物低碳运输方式及路径选择[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 777-785.

[2] 康禄. 考虑碳排放的公铁联运路径和运输方式选择优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

[3] 徐剑, 李周奇, 蒋洋. 考虑储存成本的集装箱公铁联运路径优化[J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2021, 14(2): 175-179.

[4] 李欣雅, 任舒翼, 孙岩. 集装箱公铁联运路径优化研究综述[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 579-588.

[5] 李玉民, 邱梦, 黑柏林, 等. 考虑高铁时间窗和客户满意度的生鲜品公铁联运路径选择[J]. 工业工程, 2021, 24(2): 49-56.

[6] Li, J., Wang, Y. and Du, K. (2022) Distribution Path Optimization by an Improved Genetic Algorithm Combined with a Divide-and-Conquer Strategy. *Technologies*, **10**, Article 81. https://doi.org/10.3390/technologies10040081

[7] Sun, Y. (2020) Green and Reliable Freight Routing Problem in the Road-Rail Intermodal Transportation Network with Uncertain Parameters: A Fuzzy Goal Programming Approach. *Journal of Advanced Transportation*, **2020**, Article ID: 7570686. https://doi.org/10.1155/2020/7570686

[8] Uddin, M. and Huynh, N. (2019) Reliable Routing of Road-Rail Intermodal Freight under Uncertainty. *Networks and Spatial Economics*, **19**, 929-952. https://doi.org/10.1007/s11067-018-9438-6

[9] Sun, Y., Li, X., Liang, X. and Zhang, C. (2019) A Bi-Objective Fuzzy Credibilistic Chance-Constrained Programming Approach for the Hazardous Materials Road-Rail Multimodal Routing Problem under Uncertainty and Sustainability. *Sustainability*, **11**, Article 2577. https://doi.org/10.3390/su11092577

[10] 王祺, 肖青. 模糊需求下的多中心冷链配送车辆路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(23): 341-350.

[11] 秦进, 杨淑钧, 戴博. 电商 RMFS 系统订单分配与路径规划联合优化方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 116-126.

[12] Liu, S. and Chen, H. (2019) Research on Multi-Objective Clustering Optimization of Logistics Distribution Line. *IOP Conference Series*: *Materials Science and Engineering*, **612**, Article ID: 042078. https://doi.org/10.1088/1757-899x/612/4/042078

[13] 黄俊生, 陈垚, 张安英, 等. 考虑互联互通的城市轨道交通网络列车开行方案优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1587-1597.

[14] 陈伟建. 考虑碳排放的公铁联运货流转移方案设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
[15] 陈煜婷, 张惠珍, 孙冉. 双层级医疗设施选址问题及禁忌搜索算法[J]. 运筹与管理, 2021, 30(9): 56-63.
[16] 蒋诗云, 严喜, 吴丽芳. 铁路货运运杂费核收管理优化探讨[J]. 铁道货运, 2020, 38(11): 49-53.