

低碳视角下公铁联运选址和路径集成优化研究

吴胜迁^{1,2}, 夏晓梅^{1,2}, 张 聪^{1,2}, 曾建雄^{1,2}, 王可激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27日; 录用日期: 2025年1月20日; 发布日期: 2025年1月29日

摘 要

针对公铁联运物流中心选址和路径优化中存在碳排放量和总成本过高等问题, 从低碳视角出发, 分别构建低碳视角下公铁联运物流中心选址模型和配送路径优化模型, 前者包含公铁运输成本及其碳排放成本、铁路物流中心成本及其碳排放成本等相关成本, 后者包含公路运输成本及其碳排放成本、物流中心发车成本和时间窗惩罚成本。然后, 然后使用双层规划模型将两者有机集成。最后通过混合算法对其进行求解。相关的案例分析结果显示: 非集成模型应该选择B2 (昆山站)、B5 (戚墅堰站)和B9 (龙潭站)建设为铁路物流中心服务周边客户, 派出10辆车完成配送任务; 集成模型应该选择B3 (苏州西站)、B5 (戚墅堰站)和B10 (兴卫村站)建设为铁路物流中心服务周边客户, 派出9辆车完成配送任务。另一方面, 集成模型相比非集成模型总成本的费用节省率为4.20%, 碳排放成本费用节省率为5.49%。在碳排放成本中公路运输碳排放成本占比最大, 因此, 在国家大力发展绿色低碳背景下, 应该尽可能优化公路运输过程。从而达到降低碳排放的目的。

关键词

公铁联运, 物流中心选址, 路径优化, 低碳视角, 混合算法

Study on Site Selection and Route Integration Optimization of Rail-Road Intermodal Transportation from the Perspective of Low Carbon

Shengqian Wu^{1,2}, Xiaomei Xia^{1,2}, Cong Zhang^{1,2}, Xiongjian Zeng^{1,2}, Kewei Wang³, Haixuan Huang³

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

²Smart Urban Mobility Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

³Shanghai Railway Administration, Shanghai

文章引用: 吴胜迁, 夏晓梅, 张聪, 曾建雄, 王可激, 黄海璇. 低碳视角下公铁联运选址和路径集成优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1215-1232. DOI: 10.12677/mos.2025.141110

Abstract

Aiming at the problems of high carbon emission and total cost in the location and route optimization of the logistics center of rail-road intermodal transportation, from the perspective of low carbon, the site selection model and distribution route optimization model of rail-road intermodal logistics center are constructed respectively. The former includes rail-road intermodal transportation cost and carbon emission cost, railway logistics center cost and carbon emission cost and other related costs; the latter includes road transportation cost and carbon emission cost, logistics center departure cost and time window penalty cost. Then, the two are organically integrated using a two-tier programming model. Finally, it is solved by a hybrid algorithm. The results of relevant case studies show that; The non-integrated model should choose B2 (Kunshan Station), B5 (Qishuyan Station) and B9 (Longtan Station) as the railway logistics center to serve the surrounding customers, and send 10 vehicles to complete the distribution task; The integrated model should choose B3 (Suzhou West Station), B5 (Qishuyan Station) and B10 (Xingweicun Station) to build the railway logistics center to serve the surrounding customers, and send 9 vehicles to complete the distribution task. On the other hand, the cost-saving rate of integrated model compared with the total cost of non-integrated model is 4.20%, and the cost-saving rate of carbon emission cost is 5.49%. In the carbon emission cost, the road transport carbon emission cost accounts for the largest proportion. 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, so as to achieve the purpose of reducing carbon emissions.

Keywords

Rail-Road Intermodal Transportation, Logistics Center Location, Path Optimization, Low-Carbon Perspective, Hybrid Algorithm

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

国家《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》提出,通过优化运输结构,全面推动行业绿色低碳转型。相关研究表明,铁路单位货物周转量的能耗和污染物排放仅为公路的 1/7 和 1/13,但另一方面公路运输的灵活性,也让其在最后一公里优势显著。因此“公转铁”背景下,公铁联运的物流中心地位显著。但其在末端配送网络中,普遍存在碳排放过高、配送成本高、效率低以及客户满意度不高等问题。本研究针对公铁联运的“最后一公里”配送难题,从低碳视角出发,分物流中心的选址及配送路径优化两部分展开研究,并利用双层规划模型将其有机集成。

低碳背景下公铁联运“最后一公里”配送问题一直是选址和路径优化系统中研究的热点和难点。关于物流中心选址问题。林殿盛[1]认为针对低碳物流配送中心选址问题,采用随机规划理论,建立以包含碳排放成本在内的总成本最低为目标、以不确定性需求为随机约束的选址模型,通过实例运用验证模型的有效性,能够为企业在实际市场需求波动下的选址投入以及收益提供一定的参考价值。严南南[2]认为可以以总成本之和最小与碳排放量最小为目标函数建立数学模型,并确定在不同需求物流网络中的设施

位置和数量,用 LINGO 软件对模型进行了求解,并用算例验证了模型的有效性,实现低碳经济。王万良[3]认为为了降低物流配送过程中车辆的碳排放,可以采用具有良好通用性的超启发式算法对低碳选址路径问题进行求解。将蛙跳算法作为超启发式算法的高层选择策略。实验结果表明:提出的相似度计算方式能更直观地反映个体之间的相似性,具有良好的通用性,并且在低碳选址-路径问题上获得更优秀的解。关于送货上门车辆路径规划问题。Zhu A [4]认为可以从低碳环保的角度出发,利用改进的遗传算法求解绿色物流中的选址路径优化问题,结果表明,总碳排放较少,满足经济环保的设计要求。Kang L A [5]认为位置-路径-库存问题是冷链物流的一个重要问题。构建了一个考虑碳交易机制的集成 LRIP 模型,采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对该模型进行求解。仿真结果表明,改进的 NSGA-II 能有效降低碳交易环境下企业的碳排放。Zhu S [6]认为为了优化物流配送车辆路线,提高配送效率,可以采用蚁群算法对物流配送路线进行分析。讨论了基于蚁群算法的物流配送车辆路径求解问题。仿真结果表明,蚁群算法在解决物流配送车辆路径问题上具有耗时少、效率高的优点。Ming K L [7]认为现有的冷链物流低碳 VRP 研究忽略了路网的复杂性和时变的交通条件,导致规划的配送路线没有意义,低碳问题无法得到讨论。于是考虑了路网的复杂性和时变的交通条件,准确描述了配送成本和碳排放量,为实现低碳提供了必要的前提条件。Wang W [8]认为冷链物流运输网络优化是构建低碳物流体系的重要组成部分。物流网络的完善需要遵循碳排放、成本最小化、时间最小化等条件。因此,基于遗传算法构建了低碳冷链物流运输网络层次优化模型。从案例仿真结果来看,该计算模型和理论算法在物流运输网络的低碳优化中相对准确有效,对低碳物流的发展具有一定的促进作用。Haojun [9]认为解决低碳视角的城市快递配送网络优化问题。可以考虑碳税的情况下,建立配送枢纽选择、车辆调度、需求匹配与路径的两阶段总成本最小模型。最后,利用案例数据对两阶段模型进行了验证,对快递企业具有一定的现实价值。Zheng J [10]针对不确定需求环境下的冷链物流网络问题,提出了一种多目标遗传算法(GA),即遗传算法II(NSGA-II)中的非支配排序。通过实际案例对其性能进行了测试。结果表明,NSGA-II算法的性能优于遗传算法,表明所提出的模型和多目标遗传算法在解决该问题上具有相当高的效率。关于选址和路径集成优化问题。蒋海青[11]认为选址-路径规划联合优化对于节省总成本至关重要。因此,建立了与配送中心规模、配送路径相关的低碳开放选址路径(OLRP)问题模型,并设计量子进化算法(QEA)进行求解。结果显示碳排放目标的 OLRP 在一定程度上会增大成本,量子进化算法在是求解 OLRP 问题的一种有效算法。钱振宇[12]认为在物流系统中,物流中心以及配送过程的能源消耗占整个物流能耗的 90%左右,因此物流中心的选择是否合理,路线的选择是否最优,对于节能减排具有重要的理论意义和实践价值。冷龙龙[13]认为降低物流配送过程中车辆排放量,建立以碳排放为目标的同时取送货低碳选址-路径问题模型,并利用量子超启发式算法对模型进行求解,研究表明所提算法能够在合理的时间内获得优质解,并验证了该算法的有效性和鲁棒性。

综上,“公转铁”可以有效降低能源消耗和碳排放,实现“双碳”的国家战略,特别是优化物流中心选址和铁路尽头的公路“最后一公里”配送,显得尤为突出,物流中心选址和路径优化有机结合,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”问题,构建物流中心选址模型和路径优化模型,并利用双层规划模型将两者有机集成,通过混合算法对其进行求解。并以沪宁线为例,进行相应的实证分析。

2. 上层选址模型构建

2.1. 问题描述

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,多个铁路物流中心根据客户位置和需求量的配送车辆进行公路“最后一公里”配送服务,将货物

运输到客户手中后返回原始铁路物流中心，图 1 为其示意图。

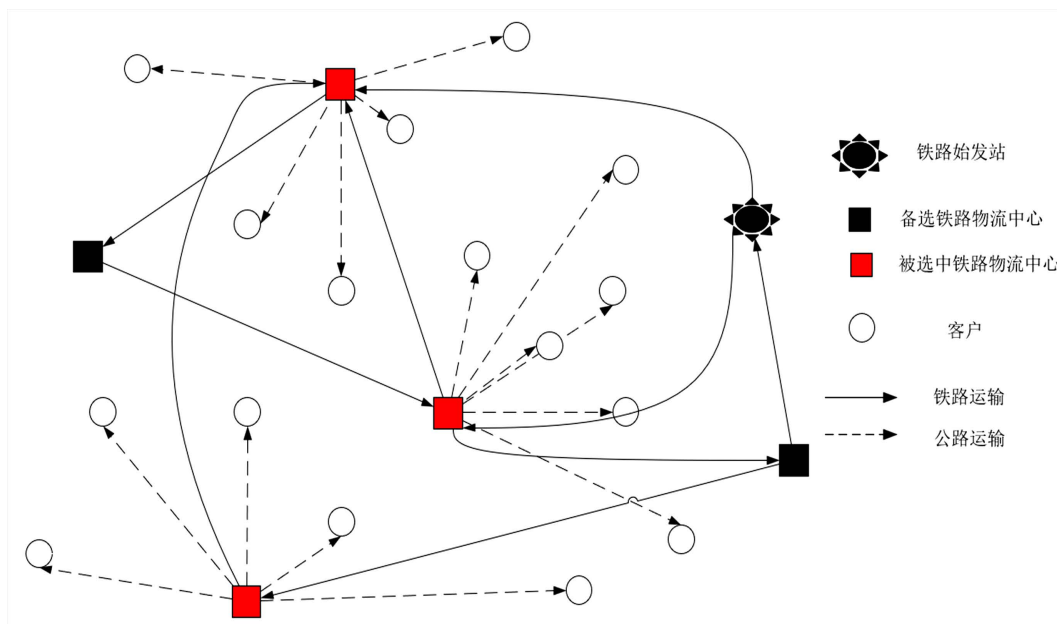


Figure 1. Schematic diagram of the location of the low-carbon intermodal railroad logistics center

图 1. 低碳公铁联运铁路物流中心选址示意图

2.2. 条件假设

- (1) 假设只有 1 个铁路始发站 r ， I 个铁路物流中心 i ， J 个客户 j 。铁路始发站到铁路物流中心是铁路运输，铁路物流中心到客户之间是公路运输。
- (2) 已知铁路始发站位置信息。
- (3) 备选铁路物流中心已经确定。
- (4) 已知铁路物流中心和客户点的位置信息。
- (5) 假设只有一种货物并且不考虑货物的形状。

2.3. 选址成本分析模型

- (1) 从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本

货物从铁路始发站出发经过铁路运输到各铁路物流中心，运输成本用铁路运输单价、运输距离和运输量的乘积来衡量。从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输成本 C_1 为：

$$C_1 = \sum_{i \in I} d_{ri} Q_{ri} E_a Z_i \quad (1)$$

其中， r 为铁路始发站， i 为铁路物流中心； d_{ri} 表示铁路始发站 r 到备选铁路物流中心 i 的铁路运输距离； Q_{ri} 表示从铁路始发站 r 到铁路物流中心 i 的铁路运输货物量； E_a 表示铁路运输的单位价格。 Z_i 表示是否在备选地点 i 处建立铁路物流中心，如果是则为 1，否则为 0。

- (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公路配送不同之处在于，不仅要考虑公路运输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。其成本参考文献[1]使用碳排放强度方法进行计算。因此，从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本为：

$$C_2 = \alpha \sum_{i \in I} d_{ri} Q_{ri} U_s Z_i \quad (2)$$

其中, α 表示碳税税率, U_s 表示铁路运输的碳排放强度。

(3) 从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本

公铁联运是一个系统, 考虑配送方便的同时还要考虑回收。因此, 需要考虑从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本。当回收的货物运输到铁路物流中心时, 铁路物流中心会对货物进行检测维修, 将不能用的回流品通过铁路运输, 运输到铁路始发站。因此, 从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输成本为:

$$C_3 = \sum_{i \in I} d_{ir} Q_{ir} E_a Z_i \quad (3)$$

其中, d_{ir} 表示铁路物流中心 i 到铁路始发站 r 的铁路运输距离; Q_{ir} 表示铁路物流中心 i 到铁路始发站 r 的铁路运输货物量; E_a 表示铁路运输的单位运输成本。

(4) 从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本

当回收的货物运输到铁路物流中心时, 将不能用的货物通过铁路运输, 运输到铁路始发站, 其碳排放成本为:

$$C_4 = \alpha \sum_{i \in I} Q_{ir} d_{ir} U_s Z_i \quad (4)$$

(5) 铁路物流中心改建成本

本文铁路物流中心是在铁路货运站的基础上进行改建。将铁路货运站职能和传统物流中心特点相结合。

铁路物流中心改建成本指: 一次性投入却可长期使用。采用直线折旧法进行计算将改建成本分为设施设备折旧费和车辆折旧费, 依据《中华人民共和国企业所得税法实施条例》, 对于物流中心的设施设备折旧年限选取为 30 年, 残值率取为 10%; 物流中心车辆折旧年限取为 15 年, 残值率取为 5%。则具体到每一天的改建成本具体表示为:

① 设施设备折旧费:

$$S_i = F_i^1 (1-10\%) / 10950 \quad (5)$$

② 车辆折旧费:

$$C_i = F_i^2 (1-5\%) / 5475 \quad (6)$$

则铁路物流中心改建成本具体表示为:

$$C_5 = \sum_{i \in I} Z_i (S_i + C_i) = \sum_{i \in I} Z_i (F_i^1 (1-10\%) / 10950 + F_i^2 (1-5\%) / 5475) \quad (7)$$

其中, F_i^1 表示铁路物流中心的改建成本; F_i^2 表示铁路物流中心配送车辆的购置成本。

(6) 铁路物流中心运营成本

铁路物流中心运营过程中需要对货物进行包装、加工等工作。此外, 铁路物流中心的货物, 需要经过装卸入库等人为操作, 消耗各种人力、物力才能完成。产生相应运营成本, 其直接与物流中心处理的货物量有关。因此, 铁路物流中心运营成本具体表示为:

$$C_6 = \sum_{i \in I} W_i Q_{ri} Z_i \quad (8)$$

其中, W_i 表示备选铁路物流中心 i 处理货物的单位成本。

(7) 铁路物流中心的碳排放成本

当货物运输到铁路物流中心时,其在流过程中,因为照明、机械作业和制冷等因素会产生相应的碳排放成本,参考文献[1]铁路物流中心碳排放成本可以表示为:

$$C_7 = \alpha \sum_{i \in I} \left(EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} J_j \mu_2 \mu_3 \mu_4 \right) Z_i \quad (9)$$

其中, EE_j 所消耗的电能(单位 MWh); δ_1 为电能的碳排放因子; 所消耗的燃油量为 J_j kg; 燃料的低位发热值为 μ_2 ; 燃料的单位热值含碳量 μ_3 ; 燃料的碳氧化率为 μ_4 。

3. 下层路径优化模型构建

3.1. 问题描述

在整个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。图2为其拓扑结构图。

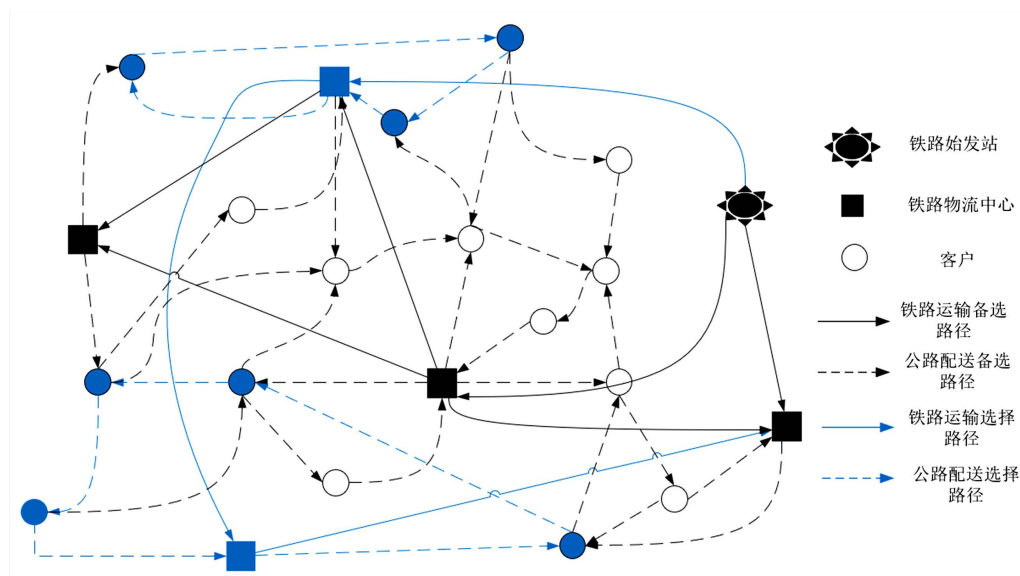


Figure 2. Topology of low-carbon public-rail transportation distribution path optimization
图 2. 低碳公铁联运配送路径优化拓扑结构图

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的配送车辆进行公路“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 。

3.2. 条件假设

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 客户点需求量和位置信息已知。

3.3. 路径优化成本分析模型

(1) 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。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：

$$C'_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d'_{ij} E_b x'^k_{ij} \quad (10)$$

其中， d'_{ij} 表示运输中铁路物流中心和客户之间的公路配送距离； E_b 表示运输中公路配送的单位配送成本。 x'^k_{ij} 表示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。

(2) 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：

$$C'_2 = \alpha U_g \sum_{i \in I} d'_{ij} x'^k_{ij} \quad (11)$$

其中， U_g 表示公路运输的碳排放强度。

(3) 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，根据铁路物流中心和客户对应关系，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：

$$C'_3 = \sum_{i \in I} C_c x'_i{}^k \quad (12)$$

其中， $x'_i{}^k$ 表示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。

(4) 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。硬时间窗表示车辆只能在规定的 $[ET, LT]$ 的时间范围内到达，如图 3 所示。软时间窗相比硬时间窗，则可以在最佳服务时间外到达，但是，如果不是在最佳服务时间到达，则会产生一定的惩罚成本。因此，软时间窗比硬时间窗更加灵活。具体如图 4 所示。

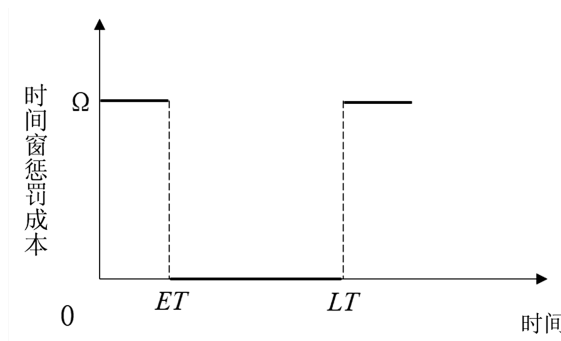


Figure 3. Hard time window vs. time window penalty cost relationship

图 3. 硬时间窗与时间窗惩罚成本关系

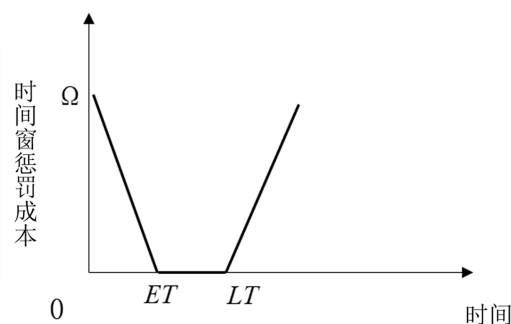


Figure 4. Relationship between soft time window and time window penalty cost
图 4. 软时间窗与时间窗惩罚成本关系

基于以上两点,本文参考文献[14]采用混合时间窗,计算惩罚成本。如图 5 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。

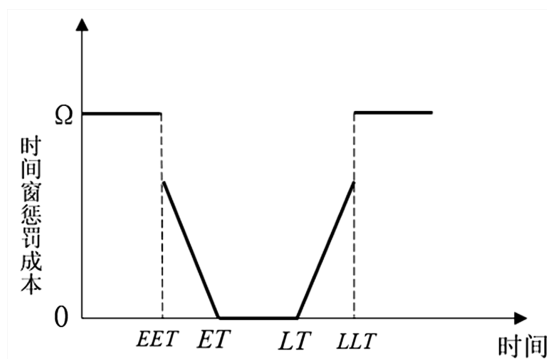


Figure 5. Hybrid time window vs. time window penalty cost relationship
图 5. 混合时间窗与时间窗惩罚成本关系

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。

$$f(T_j^k) = \begin{cases} \Omega, & T_j^k < EET \text{ 或 } T_j^k > LLT \\ (ET - T_j^k), & EET \leq T_j^k < ET \\ T_j^k - LT, & LT < T_j^k < LLT \\ 0, & ET < T_j^k < LT \end{cases}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (13)$$

$$C'_4 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f(T_j^k) C_l y_j^k \quad (14)$$

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; $f(T_j^k)$ 是运输中,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。

4. 双层规划模型构建

在物流网络优化问题中，包含两个主要子问题：铁路物流中心选址问题和配送路径优化问题，这两个问题的决策间存在效益背反现象。因此，本章通过构建双层规划数学模型，将两者集成进行统筹考虑分析[15]。总体而言，上层选址模型包含 7 个子成本，下层路径优化模型包含 4 子成本，由此构建低碳视角下公铁联运物流中心选址和配送路径优化双层规划模型，目标函数如下：

上层选址模型目标函数为：

$$\begin{aligned} \min C_u &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 \\ &= \sum_{i \in I} d_{ri} Q_{ri} E_a Z_i + \alpha \sum_{i \in I} d_{ri} Q_{ri} U_s Z_i + \sum_{i \in I} d_{ir} Q_{ir} E_a Z_i + \alpha \sum_{i \in I} Q_{ir} d_{ir} U_s Z_i \\ &\quad + \sum_{i \in I} Z_i \left(F_i^1 (1-10\%) / 10950 + F_i^2 (1-5\%) / 5475 \right) + \sum_{i \in I} W_i Q_{ri} Z_i + \alpha \sum_{i \in I} \left(EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} J_j \mu_2 \mu_3 \mu_4 \right) Z_i \end{aligned} \quad (15)$$

约束条件：

$$R_r \geq \sum_{i \in I} Q_{ri} \quad (16)$$

式(16)表示，铁路始发站的供应能力大于等于所有备选铁路物流中心的需求量。其中 R_r 表示铁路始发站的供应能力； $\sum_{i \in I} Q_{ri}$ 表示所有备选铁路物流中心的需求量。

$$X_i \geq R_r + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} Z_i \quad (17)$$

式(17)表示，铁路物流中心的仓储能力大于等于铁路始发站的供应能力和所有客户需求量的总和，其中 X_i 表示铁路物流中心的仓储能力； $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} Z_i$ 表示所有客户需求量的总和， Q_{ij} 表示每个客户需求量。

$$Y_i \geq R_r + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} Z_i \quad (18)$$

式(18)表示，铁路物流中心的处理货物能力大于等于铁路始发站的供应能力和所有客户需求量的总和，其中 Y_i 表示铁路物流中心处理货物能力。

$$\sum_{i \in I} Z_i = P_i \quad (19)$$

式(19)表示，允许建设铁路物流中心的数量为整数，其中 P_i 为允许建设铁路物流中心的数量，单位是个。

下层路径优化目标函数为：

$$\begin{aligned} \min C'_{sd} &= C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4 \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d'_{ij} E_b x_{ij}^{rk} + \alpha U_g \sum_{i \in I} d'_{ij} x_{ij}^{rk} + \sum_{i \in I} C_c x_i^{rk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f(T_j^{rk}) C_l y_j^{rk} \end{aligned} \quad (20)$$

约束条件：

$$Q_i^{rk} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_a x_{ij}^{rk} \leq Q_{\max}, \quad \forall k \in K \quad (21)$$

式(21)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_i^{rk} 表示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。

$$\lambda'_j = (\lambda'_i + t'_i + t'_{ij}) x_{ij}^{rk} \quad (22)$$

式(22)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' 表示运输中到达点 i 的时刻, t_i' 表示运输中在节点 i 的服务时间, t_{ij}' 表示运输中从节点 i 到节点 j 的运输时间。 λ_j' 表示运输中到达节点 j 的时刻。

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} x_{ij}^{rk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} x_{ij}^{rk} = 1, \quad \forall i \in I \quad (24)$$

式(23)和(24)表示每个客户有且仅有一次被服务。

$$\sum_{i \in I} x_i^{rk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (25)$$

式(25)表示每辆车最多只能使用一次。

$$x_{ij}^{rk} \leq y_j^{rk}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (26)$$

式(26)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。

5. 模型求解

由模型可知, 本文构建的双层规划模型属于 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[16]。因此, 本文上层采用收敛速度快和全局搜索能力强的多种群遗传算法求解, 下层采用局部搜索能力较强的禁忌搜索算法求解。

具体模型求解流程为:

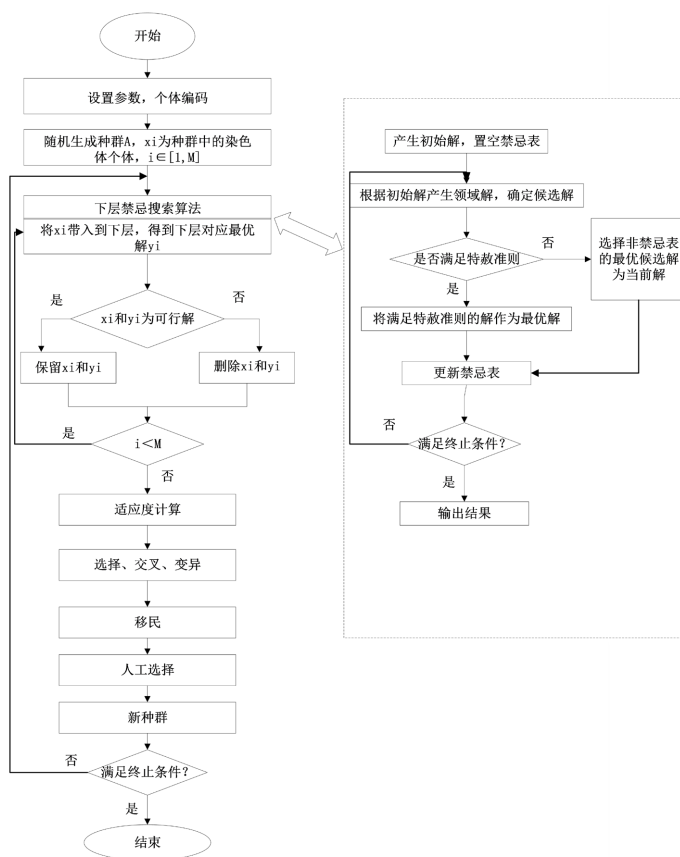


Figure 6. Schematic flow of multiple swarm genetic—taboo hybrid algorithm
图 6. 多种群遗传——禁忌混合算法的流程示意图

首先, 将上层规划的初始化种群中个体 x 代入到下层规划中去, 并利用禁忌搜索算法进行优化求解得出对应最优解 y ; 其次, 将所求的下层规划最优解 y 代入到上层规划中, 利用适应度函数计算个体 x 对应的最优目标函数值; 最后, 对种群进行选择、交叉和变异等遗传操作, 利用迭代求出或者逼近模型最优解。

具体流程步骤如图 6 所示:

(1) 初始化。包括编码、随机初始化种群、设置种群规模、初始交叉概率、初始变异概率、禁忌长度、禁忌表以及最大迭代次数等参数。

(2) 对于上层规划的种群中染色体代入到下层规划模型中, 利用禁忌搜索求解对应的最优路径, 并且对应起来。判断最优解是否满足上层规划的约束条件, 满足则保留, 否则删除。

(3) 对得到的种群进行遗传操作, 产生的子代染色体组成新种群, 进行下一次迭代。

(4) 判断在 10 次迭代内, 迭代后的适应度函数值与迭代前的是否都在 5% 以内浮动, 如果是可以认为终止, 否则重复执行步骤(2)。

(5) 算法结束, 输出模型最优解。

6. 案例分析

6.1. 案例基本数据

(1) 选址相关信息

现有一批农副产品需要从沪宁线始发站南翔站, 运输到客户手中, 客户为沪宁线周边农副产品经销商。已知所有客户分布在备选铁路物流中心附近, 因此为节约成本, 计划采用公铁联运运输方式进行运输。假设该工厂已提前把产品运输到铁路始发站, 上海南翔站其坐标为(121.309572, 31.28768)并且有足够的仓储空间。图 7 为备选铁路物流中心及需求点位置分布图。

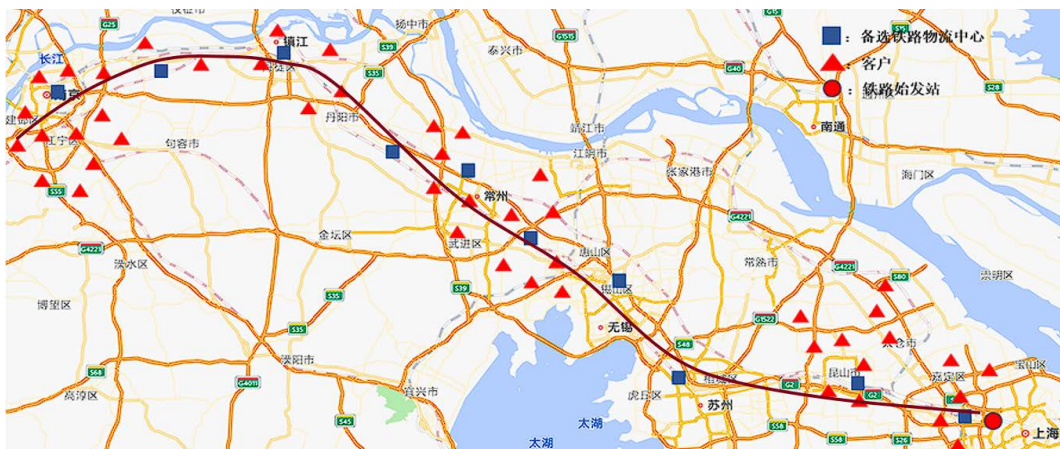


Figure 7. Alternative railway logistics center and customer location map

图 7. 备选铁路物流中心及客户位置分布图

在图 7 中右下角红色圆圈表示铁路始发站, 上海南翔站(121.309572, 31.28768), 蓝色正方向表示备选铁路物流中心, 共 10 个, 红色三角形表示客户, 共 46 个。

根据客户的位置和沪宁线现有铁路货运站情况, 从众多铁路货运站中选出 10 个作为备选铁路物流中心, 该工厂计划, 从中选出合适的改建为铁路物流中心, 专门负责沪宁线周边农副产品需求。备选铁路物流中心信息包括: 备选铁路物流中心的编号、经纬度信息、固定建设费用、处理货物的单位成本、最

大处理能力和车辆购置成本、耗电量和耗油量等。

(2) 路径相关信息

路径相关信息又可以分为路径客户相关信息、碳排放基本信息、能源排放参考系数以及其他基本信息。

路径客户相关信息包括：客户编号、经纬度信息、配送量、时间窗和服务时间。

碳排放基本信息主要包括：碳税税率、铁路运输的碳排放强度、公路运输的碳排放强度和电能的碳排放因子。具体数值如表 1 所示。

Table 1. Data related to carbon emission fees
表 1. 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 ¥/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)
电能的碳排放因子	δ_1	0.8959 t-CO ₂ /kg

能源排放参考系数本文以柴油为例，主要包括柴油的平均低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率。具体数值如表 2 所示。

Table 2. Energy carbon emission reference factors
表 2. 能源碳排放参考系数

能源种类	平均低位发热量 kJ/kg	单位热值含碳量 kJ/kg	碳氧化率 t-C/TJ
柴油	42652	20.2	0.98

其他基本信息，比如公路运输费用，铁路运输费用，车辆基本信息等。公路运输费用参考文献[17]为 0.466 ¥/t·km。

铁路运输费用基于《铁路货物运价规则》，可以表示为：

$$p_c = [p_a + p_b \cdot X_k] \cdot T_i \tag{27}$$

p_c 表示铁路运输运费； p_a 表示基价 1； p_b 表示基价 2； X_k 表示运费里程； T_i 表示计费重量。其中，采用 4 号运价，基价 1 为 9.3 ¥/t，基价 2 为 0.0434 ¥/(t·km) [18]；

每辆车的载重量为 5 t，每辆车的发车成本为 300 元，柴油 5.8 ¥/L，整车质量为 9 t，单位时间惩罚成本 C_l 为 2 ¥/min。

(3) 算法参数设置

针对上层选址优化模型，采用多种群遗传算法对其进行求解。将种群规模设置为 100，种群数量设置为 3，种群交叉概率分别为 0.8、0.7 和 0.6，种群变异的概率设置成 0.2、0.3 和 0.4，终止条件设置为 10 代内，适应度函数差值在 5% 以内。

针对下层禁忌搜索算法，本文将禁忌搜索算法的种群规模设置为 100，禁忌长度设置为 10，终止条件设置为 10 代内，适应度函数差值在 5% 以内。

通过对算法的主要参数进行设定。上层算法为整个双层规划模型算法的主程序，在迭代完成时将每一次的选址方案传入到下层禁忌搜索算法，下层算法根据选址的初始方案进行计算，得到铁路物流中心的分配方案，同时将结果返回到上层模型中，上层模型根据其结果再次调整选址方案，重复此次操作直至得出最终的选址及路径优化方案。

6.2. 方案结果分析

(1) 非集成选址和路径的案例结果分析

以 2.2 节上层选址模型为目标函数, 4.1 节案例信息为基础数据, 在 MATLAB 上使用多种群遗传算法求解。结果如图 8 所示。选址模型应该在 10 个备选铁路物流中心中选择 B2 (昆山站)、B5 (戚墅堰站) 和 B9 (龙潭站) 建设为铁路物流中心服务周边客户。图 8 为非集成选址方案连接图。

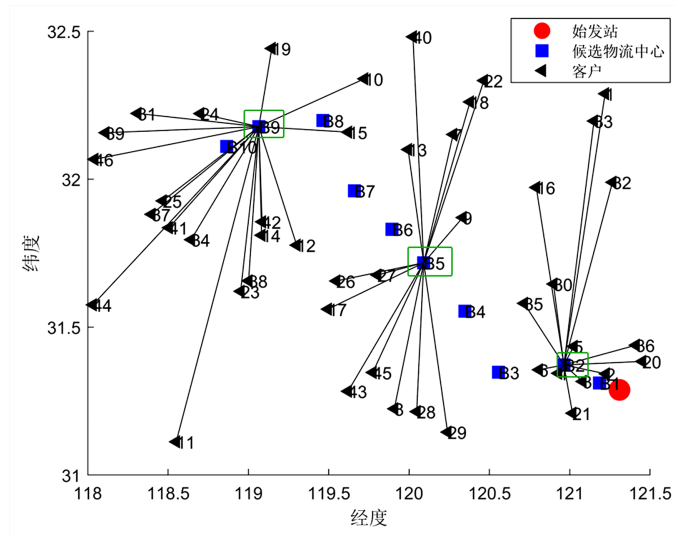


Figure 8. Non-integrated siting scheme connection diagram

图 8. 非集成选址方案连接图

由图 8 可知, 红色圆圈表示铁路始发站上海南翔站, 其坐标为(121.309572, 31.28768), 蓝色正方形示候选物流中心, 从右下角到左上角一共 10 个, 黑色三角形表示客户, 分布在铁路附近, 共 46 个。其次, 在非集成路径案例分析结果中, 以 2.3 节配送路径优化模型为目标函数, 4.1 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 9 所示。

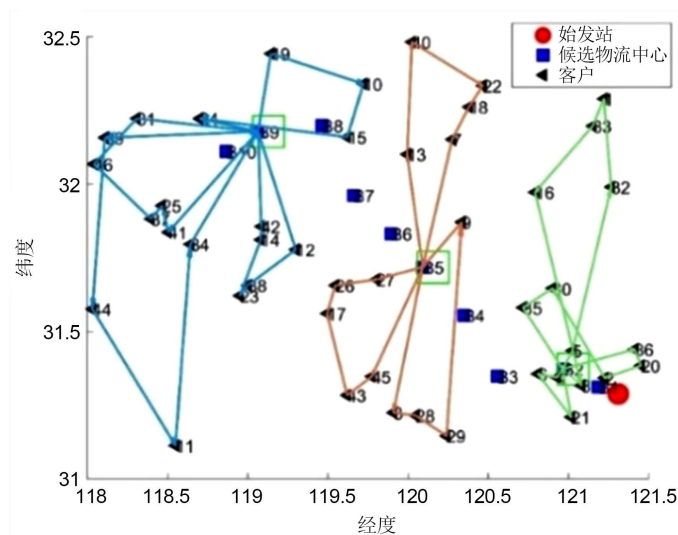


Figure 9. Non-integrated path optimized connection diagram

图 9. 非集成路径优化连接图

图 9 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。详细相关信息如表 3 公路配送路径相关数据所示。

Table 3. Data related to road distribution routes
表 3. 公路配送路径相关数据

车辆	归属铁路物流中心	配送顺序							服务客户数
1	B2 (昆山站)	36	20	2	3	21			5
2	B2 (昆山站)	5	35	29	6	4			5
3	B2 (昆山站)	30	16	33	1	32			5
4	B5 (戚墅堰站)	28	8	45	43	17	26	27	7
5	B5 (戚墅堰站)		15	10	40				3
6	B5 (戚墅堰站)	9	22	18	7	13			5
7	B9 (龙潭站)		24	31	39	46			4
8	B9 (龙潭站)		19	12	14	42			4
9	B9 (龙潭站)	38	23	34	41	25			5
10	B9 (龙潭站)		44	11	37				3

(2) 集成模型的选址和路径模型的案例结果分析

当上层选址模型和下层路径优化模型与双层规划模型结合时。以 2.3 节双层规划模型为目标函数，4.1 节案例信息为基础数据，在 MATLAB 上使用多种群遗传—禁忌搜索混合算法求解。结果如图 9 所示。

求解出其上层选址结果，应该在 10 个备选铁路物流中心中选择 B3 (苏州西站)、B5 (戚墅堰站)和 B10 (兴卫村站)建设为铁路物流中心服务周边客户。图 10 为集成选址方案连接图。

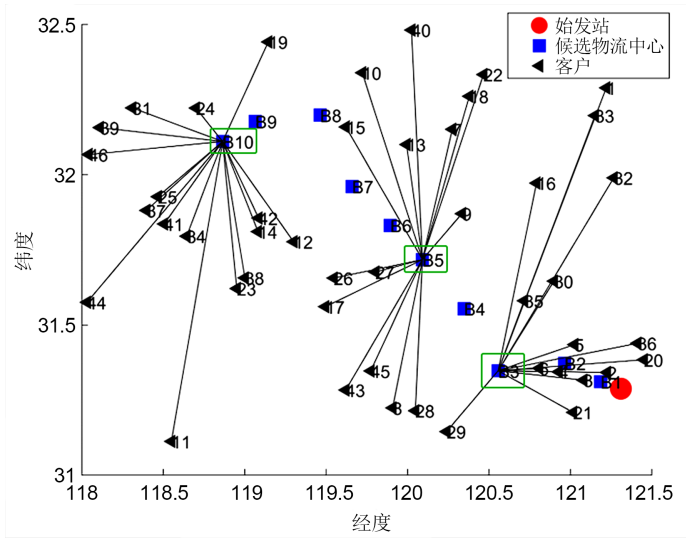


Figure 10. Integrated siting program connection diagram
图 10. 集成选址方案连接图

同理，以双层规划模型为一个整体，下层路径求解结果如图 11 所示。

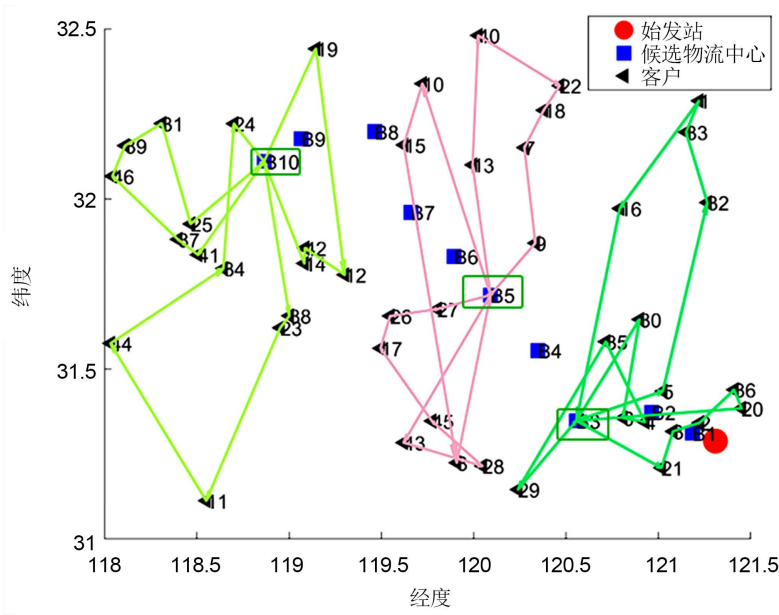


Figure 11. Integration path optimization connection diagram
图 11. 集成路径优化连接图

根据计算结果得出下层配送部分应该派出 9 辆车进行配送，详细相关信息如表 4 公路配送路径相关数据所示。

Table 4. Data related to road distribution routes
表 4. 公路配送路径相关数据

车辆	归属铁路物流中心	配送顺序						服务客户数
1	B3 (苏州西站)	30	16	33	1	32		5
2	B3 (苏州西站)	36	20	2	3	21		5
3	B3 (苏州西站)	5	35	29	6	4		5
4	B5 (戚墅堰站)	27	26	17	43	45	8	7
5	B5 (戚墅堰站)	9	7	18	22	40	13	6
6	B5 (戚墅堰站)			10	15			2
7	B10 (兴卫村站)	34	41	37	46	39	31	7
8	B10 (兴卫村站)		25	44	11	23	38	5
9	B10 (兴卫村站)		42	14	12	19		4

6.3. 数据对比分析

本节主要对前文案例结果的相关成本进行分析。一方面，因为集成模型为一个整体，所以本节分为总成本对比分析；另一方面，因为本文研究低碳视角下选址和路径成本分析，所以又分为碳排放成本分析。

(1) 非集成和集成总成本对比分析

通过对非集成和集成模型进行求解，得出表 5 为非集成和集成总成本对比表。

Table 5. Comparison of non-integrated and integrated total cost of ownership
表 5. 非集成和集成总成本对比表

编号	各项成本	集成/元	非集成/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	1462.15	1402.44	-4.26%
2	从铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本	56.75	54.02	-5.05%
3	铁路物流中心改建成本	5589.5	5286.76	-5.73%
4	铁路物流中心运营成本	994.42	1093.38	9.05%
5	铁路物流中心的碳排放成本	412.55	439.05	6.04%
6	公路配送成本	8331.02	9289.24	10.32%
7	公路配送碳排放成本	500.68	539.33	7.17%
8	铁路物流中心发车成本	2700	3000	10.00%
9	公路配送时间窗惩罚成本	744.23	767.59	3.04%
—	总成本	22348.85	23328.27	4.20%

根据表 5 可得集成模型相比非集成模型节省 4.20% 的费用。原因在于：非集成模型算法求解为两阶段求解，上层只传输选址结果到下层，上层目标函数求出的最优解和下层目标函数求出的最优解没有关联。而集成模型求解算法为嵌套求解，上层和下层之间有关联，更容易求出较好解。其次，公路配送成本费用节省率最高，为 10.32%，原因在于：双层规划集成模型求出的解，通过设置更加合理的选址地点达到了减少配送里程的作用，而公路配送成本只与里程和配送单价有关，配送单价又为常量。因此，公路配送成本会减少。最后，最低的为铁路物流中心改建成本-5.73%。这是因为集成和非集成模型选址地点不同，而每个选址地点原始数据略有差异，因此，铁路物流中心改建成本会增加。表 6 为非集成和集成选址结果。

Table 6. Non-integrated and integrated siting results
表 6. 非集成和集成选址结果

模型	选址结果
集成模型	B3 (苏州西站)、B5 (戚墅堰站)和 B10 (兴卫村站)
非集成模型	B2 (昆山站)、B5 (戚墅堰站)和 B9 (龙潭站)

其中，费用节省率表示：集成模型相比非集成模型节省的成本，如果为正数表示集成模型相比非集成模型成本减少；如果为负数表示集成模型相比非集成模型成本增加。具体计算公式为：

$$f_l = \frac{f_f - f_j}{f_f} \tag{28}$$

式子中， f_l 表示费用节省率， f_f 表示非集成模型各项成本， f_j 表示集成模型各项成本。

(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。其次，根据模型特点。

为详细分析非集成和集成碳排放成本中的各项成本，本节对表 5 进行筛选整合，得出表 7 非集成和集成碳排放成本对比表。

Table 7. Comparison of non-integrated and integrated carbon costs
表 7. 非集成和集成碳排放成本对比表

编号	各项成本	集成/元	非集成/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	56.75	54.02	-5.05%
2	铁路物流中心的碳排放成本	412.55	439.05	6.04%
3	从铁路物流中心到铁路始发站的铁路运输碳排放成本	56.75	54.02	-5.05%
4	公路配送碳排放成本	500.68	539.33	7.17%
—	总成本	1026.73	1086.42	5.49%

其中，费用节省率与 28 计算公式相同。

集成模型相比非集成模型碳排放总成本减少 5.49%。其中公路配送碳排放成本费用节省率最高，原因在于：集成和非集成模型选址不同，导致下层配送方案不同，进而影响配送里程，最终影响到配送成本。

铁路始发站到铁路物流中心的铁路运输碳排放成本和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率最低，原因在于：集成和非集成模型选址不同，导致铁路运输距离不同，从而影响到与铁路相关的成本。

7. 结论

本研究从低碳视角出发，构建了公铁联运选址和路径优化的双层规划模型，上层解决铁路物流中心的选址问题，下层解决路径优化问题。上层选址模型使用多种群遗传算法进行求解，下层路径优化模型使用禁忌搜索算法。最终采用多种群遗传 - 禁忌搜索混合算法对双层规划模型进行求解，实现了选址和路径优化的有机集成。最后以沪宁线及周围物流中心为研究对象进行案例分析，结果表明：

(1) 非集成模型应选择 B2 (昆山站)、B5 (戚墅堰站)和 B9 (龙潭站)建设为铁路物流中心服务周边客户，需派出 10 辆车完成配送任务；集成模型应选择 B3 (苏州西站)、B5 (戚墅堰站)和 B10 (兴卫村站)建设铁路物流中心服务周边客户，派出 9 辆车即可完成配送任务。

(2) 集成模型相比非集成模型总成本费用节省率为 4.20%，碳排放成本费用节省率为 5.49%。这主要是因为双层规划集成模型上层选址和下层路径优化相互关联，能求出更优解。其中，公路配送成本节省率最高(10.32%)，原因是集成模型通过更合理选址减少了配送里程，且配送单价不变；铁路物流中心改建成本节省率最低(-5.73%)，是由于不同选址地点原始数据差异导致成本增加。碳排放成本方面，公路配送碳排放成本节省率最高，是因为不同选址影响配送方案和里程；铁路运输相关碳排放成本节省率最低，源于选址不同导致铁路运输距离变化。

本研究为公铁联运在低碳视角下的物流中心选址和路径优化提供了有效的模型和算法支持，有助于推动公铁联运的发展，提高物流效率，降低碳排放，实现“双碳”战略目标。

未来研究可进一步考虑更多实际因素，如货物多样性、交通拥堵状况、铁路和公路运输能力动态变化等，以提高模型的准确性和实用性；同时，可探索更高效的算法来求解复杂的双层规划模型，为实际物流决策提供更精确的指导。

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] 林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 梁希, 石永强. 需求不确定下的低碳物流配送中心选址[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 492-500.
- [2] 严南南, 李明. 基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 40(52): 42-50.
- [3] 王万良, 徐昶, 赵燕伟. 基于超启发式算法的选址-路径问题研究[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(6): 17-25.
- [4] Zhu, A. and Wen, Y. (2021) Green Logistics Location-Routing Optimization Solution Based on Improved GA Algorithm Considering Low-Carbon and Environmental Protection. *Journal of Mathematics*, **2021**, Article ID: 6101194. <https://doi.org/10.1155/2021/6101194>
- [5] Kang, L.A., Dan, L.A. and Dw, B. (2022) Carbon Transaction-Based Location-Routing-Inventory Optimization for Cold Chain Logistics-ScienceDirect. *Bulletin of Science and Technology*, **103**, 32-36.
- [6] Zhu, S., Dong, W. and Liu, W. (2017) Logistics Distribution Route Optimization Based on Genetic ant Colony Algorithm. *Journal of Qinzhou University*, **53**, 45-54.
- [7] Bai, Q., Yin, X., Lim, M.K. and Dong, C. (2021) Low-Carbon VRP for Cold Chain Logistics Considering Real-Time Traffic Conditions in the Road Network. *Industrial Management & Data Systems*, **122**, 521-543. <https://doi.org/10.1108/imds-06-2020-0345>
- [8] Wang, W. (2019) Optimization of Low-Carbon Logistics Transportation Network Based on Genetic Algorithm. *Journal of Dongguan University of Technology*, **103**, 111-115.
- [9] Miao, H.H., et al. (2019) Two-Stage Optimization of Low Carbon Logistics Distribution Network Considering Carbon-Tax Constraint. *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Global Economy, Finance and Humanities Research (GEFHR 2019)*, Tianjing, 15 Jun 2019, 7. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=logPUsRAn-KmV14fexmLyoWZrlu5bqCdRup8c-aZqhgo9p8lFttvqy-sYzHvHWVdzW8MeFft7r0Gl8Ogy1lMyBABjsffs54JWPlcX-fod6YSjwR3lb5ckcJFaq0_YKJexpgbAFzRVmBj338scfMU3IEE-vrxMsDV7Rt56G_6KwEgB_ijCel32_Vlg==&uniplatform=NZKPT
- [10] Zheng, J. (2017) Models for Location Inventory Routing Problem of Cold Chain Logistics with NSGA-II Algorithm. *Journal of Dong-hua University: English Edition*, **34**, 7-18.
- [11] 蒋海青, 赵燕伟, 张景玲. 基于碳排放的开放选址-路径问题及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(1): 130-140.
- [12] 钱振宇. 考虑碳排放的物流配送选址-路径问题模型及其优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [13] 冷龙龙, 赵燕伟, 蒋海青. 求解物流配送同时取送货低碳选址-路径问题的量子超启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 140-145.
- [14] 朱益阳. 时变路网下多配送中心的生鲜农产品配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- [15] 栾峦. 基于双层规划的生鲜农产品冷链配送中心选址及路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.