

低碳视角下面向公铁联运的铁路物流中心选址研究

石长峰^{1,2}, 姚 佼^{1,2*}, 张 聪^{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14日; 录用日期: 2025年1月5日; 发布日期: 2025年1月15日

摘 要

“公转铁”背景下优化铁路运输“最后一公里”配送问题十分重要, 基于此引入铁路物流中心这一概念, 建立了经典铁路物流中心选址模型; 结合“双碳”背景充分考虑了公铁联运运输过程和铁路物流中心照明、机械作业和制冷等因素产生的碳排放成本, 建立了低碳视角下的铁路物流中心选址成本改进模型, 并采用一种具有记忆功能的全局逐步搜索算法——禁忌搜索算法对其求解。最后, 以沪宁线周边铁路物流中心选址为例, 当考虑碳排放成本时, 铁路物流中心的选址由4个降至2个, 物流中心改建成本的费用节省率高达39.62%; 关于各部分碳排放的构成来看, 公路和铁路运输碳排放的占比分别为19.08%和1.67%; 此外物流中心燃料消耗的占比高达48.71%。因此, 基于绿色“低碳”视角下, 配送过程中应尽量减少公路运输, 使用铁路运输; 物流中心应尽量减少燃油消耗量, 更多的使用绿色替代能源。

关键词

铁路物流中心选址, 低碳视角, 公铁联运, 禁忌搜索算法, 碳排放成本

Study on the Location of Railway Logistics Center Oriented to Highway-Railway Combined Transportation in Perspective of Low Carbon

Changfeng Shi^{1,2}, Jiao Yao^{1,2*}, Cong Zhang^{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

*通讯作者。

文章引用: 石长峰, 姚佼, 张聪, 王可激, 黄海璇. 低碳视角下面向公铁联运的铁路物流中心选址研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 366-378. DOI: 10.12677/mos.2025.141035

Received: Dec. 14th, 2024; accepted: Jan. 5th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

Under the background of “road to railway”, it is very important to optimize the distribution of “the last kilometer” of railway transportation, so the concept of railway logistics center is introduced, the classical location selection model of railway logistics center is established; Combined with background of “carbon peak and carbon neutrality” fully consider the public transportation in transportation and railway logistics center, lighting, mechanical work and cooling etc. The cost of carbon emissions, set up under the perspective of low carbon model of railway logistics center location cost improvement and adopts a step by step with memory function in global search algorithm, tabu search algorithm for its solution. Finally, taking the site selection of railway logistics center around Shanghai-Nanjing Line as an example, when considering the carbon emission cost, the site selection of railway logistics center is reduced from 4 to 2, and the cost saving rate of logistics center reconstruction is as high as 39.62%. As for the composition of carbon emissions, road and railway transport accounted for 19.08% and 1.67% of carbon emissions respectively. In addition, the fuel consumption of logistics center accounts for 48.71%. Therefore, from the perspective of green “low-carbon”, road transport should be reduced as far as possible in the distribution process, and railway transport should be used; Logistics centers should try to reduce fuel consumption and use more green alternative energy.

Keywords

Location of Railway Logistics Center, Perspective of Low Carbon, Rail-Railway Intermodal Transportation, Tabu Search Algorithm, Carbon Cost

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

物流作为交通领域的能耗大户，其各个环节的碳排放对于实现“双碳”目标至关重要。据统计，全国 90%以上的汽油和 60%以上的柴油均被物流业所消耗，尤其是运输过程和物流中心运营过程[1]。另一方面，在“公转铁”和“双碳”背景下，铁路最后一公里配送问题越来越受到重视，其中重要的解决办法之一就是建立铁路物流中心。铁路物流中心是以铁路运输为主导、公路运输为依托、通过科学的方法确定其合适的位置，在实现低碳环保的同时使整个铁路物流中心配送系统总成本最小。因此，本文从低碳视角下建立相关的成本模型，研究铁路物流中心选址。

物流中心选址问题，大多文献集中在带有时间窗的低碳物流中心选址、需求不确定下的低碳物流中心选址和冷链物流中心选址等方面。Huang 等[2]通过考虑配送中心选址容量约束和时间窗约束，以固定成本、可变成本、节点间配送成本和时间惩罚成本之和为目标函数构建模型；林殿盛等[3]细化配送中心和运输过程中碳排放产生的原因，全程考虑碳排放成本建立模型，并且详细分析碳排放各子成本；Wang 等[4]建立了具有生鲜农产品特点的配送选址 - 路径模型，并且参考欧洲国家的碳税政策分析了其对碳排放量的影响；裴爱晖[5]等建立了考虑运输成本及环境成本的物流园区选址模型，经过科学系统分析得出物流园区距离干线公路越近时，其总体碳排放量及综合运输成本最低；吴芳芸等[6]基于辐射式理论构建了物流配送网络，通过与传统直通型配送模式相比，得出基于辐射式理论构建的物流配送网络更有优势。

在公铁联运方面，大多文献集中在公铁联运配送方案优化，公铁联运枢纽选址方案优化或者以公铁联运为供应链的利益博弈等。谢海红等[7]构建了公铁联运三级配送网络，并且优化三级配送网络路径，从客户角度出发建立模型，证明货运站确实可以降低物流总费用；Dam K 等[8]构建了一种评估公铁联运物流中心选址决策的模型，包括五种主要类型，基于此提出一种 agent 智能体选址过程；段华薇等[9]基于竞争博弈理论并且引入随机市场需求函数和协议运量因子构建模型，认为分散决策下供应链收益较低。

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，但公铁的衔接，特别是作为最后一公里的物流中心作用就显得尤为突出，因此其选址问题直接关系整个社会的物流效率和碳排放的大局。

基于此，本文主要分四部分进行研究。首先，分析低碳铁路物流中心选址特点。其次，构建经典铁路物流中心选址模型和低碳视角下的铁路物流中心选址模型。再次，在 MATLAB 上运用禁忌搜索算法绘制配送策略图。最后，基于经典视角下铁路物流中心选址和低碳视角下铁路物流中心选址，对各子成本数据详细分析，得出相关结论。

2. 低碳模式下公铁联运铁路物流中心选址特点

交通运输部的相关数据显示，公路货物运输的单位能耗是铁路运输的 4 倍，二氧化碳排放强度是铁路的 9 倍[10]。所以，为了减少碳排放量，应该减少公路运输，更多的利用铁路运输，尤其是大宗型货物。结合国家大力发展“公转铁”和“双碳”的政策背景，铁路运输与物流行业有机融合显得十分重要。铁路物流中心又是铁路和物流结合的重要枢纽中心，所以铁路物流中心的建设势在必行。铁路物流中心和传统物流中心相比还是有很大区别的。比如，传统物流中心只涉及公路运输，然而铁路物流中心不仅涉及公路运输也涉及铁路运输；传统物流中心上游是工厂而铁路物流中心上游是工厂或铁路货运站；传统物流中心处理货物类型以中小型货物为主而铁路物流中心以大中型货物为主；传统物流中心建设在公路主干道即可，但是铁路物流中心要建设在临近铁路并且与公路主干道交汇处，表 1 为传统物流中心和铁路物流中心的区别。

Table 1. The difference between traditional logistics center and railway logistics center

表 1. 传统物流中心和铁路物流中心的区别

内容	传统物流中心	铁路物流中心
涉及交通方式	只涉及公路运输	公铁运输
上游	工厂	铁路货运站或者铁路
下游	配送中心或需求点	是配送中心或需求点
服务对象	以客户为中心	以客户为中心
处理货物类型	中小型货物为主	大中型货物为主
建设位置	公路主干道	铁路货运站和公路主干道
建设规模	较大型	大型
物流“七大”功能	具备	具备
设施设备	不具备处理大中型货物设备	具备处理大中型货物设备

3. 问题描述及条件假设

3.1. 问题描述

关于公铁联运模型下铁路物流中心的选址，分为两种模式，第一种是在一定范围内重新建立一个物流中心。第二种是这片区域已经有铁路货运站，在这已有的铁路货运站中选择一个并且进行适当的改造。

在铁路物流中心选址过程中要考虑三个方面：一是从上游通过铁路运输运输到铁路物流中心的货物；二是铁路物流中心对运送过来的货物根据客户需求进行转运、仓储、装卸搬运等工作；三是根据每个需求点的需求展开以公路运输为主的配送服务。故此，整个选址应以铁路物流中心为主要服务，公路运输和铁路运输为功能性服务的配送供应链。

对于绿色低碳向导，在指标体系构建中，应主要包括公铁运输成本、铁路物流中心成本、碳排放成本等 3 个一级指标，其中铁路物流中心又可以分解为固定建设成本、库存单位成本、装卸单位成本等 3 个二级指标；碳排放成本可以分解为铁路产生的碳排放成本、公路产生的碳排放成本、货物中转产生的碳排放成本等 3 个二级指标。根据社会经济数据和物流中心位置之间的相关性，80%的物流中心位于高收入地区，并且大多数物流中心位于距离公路轴线两公里的缓冲区内，以及距离铁路五公里的缓冲区内 [11]。因此，在指标体系的构建中又加入了当地经济水平和周边交通状况两个一级指标。综上，面向低碳的公铁联运铁路物流中心选址的评价指标体系可以用图 1 表示。

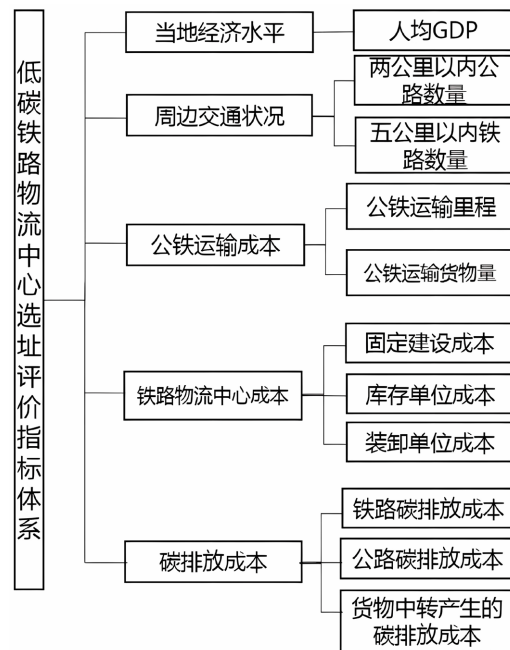


Figure 1. Evaluation index system of location selection of low-carbon railway logistics center

图 1. 低碳铁路物流中心选址评价指标体系

3.2. 条件假设

假设只有 1 个供应商 i ， m 个铁路物流中心 j ， n 个需求点 k 。供应商到铁路物流中心是铁路运输，铁路物流中心到需求点之间是公路运输。

- (1) 假设配送车辆正常行驶，不考虑因拥堵和天气因素导致车辆停滞产生的碳排放；
- (2) 铁路物流中心的仓储能力大于供应商提供的货物和各需求点相加货物的总和；
- (3) 假设只有一种货物并且不考虑货物的形状；
- (4) 铁路运输车型统一，公路配送车型统一；

4. 模型构建与求解

在分析经典铁路物流中心选址成本模型的基础上，基于低碳视角，从运输过程、铁路物流中心的碳

排放成本等角度对其进行改进，并在 MATLAB 上运用禁忌搜索算法绘制配送策略图。

4.1. 经典铁路物流中心选址成本模型

经典公铁联运铁路物流中心选址成本主要包括公铁运输成本和铁路物流中心成本。公铁运输成本指货物因为运距和运量不同在公路运输和铁路运输中产生的成本，铁路物流中心成本包括固定建设成本和货物处理成本。其中固定建设成本相比于一般物流中心还包括，比如，大型龙门吊和站内铁路轨道成本。

综上，经典铁路物流中心选址成本 C_1 可以表示为：

$$C_1 = \sum_{j=1}^m d_{ij} Q_{ij} E_{ij} Z_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n d_{jk} Q_{jk} E_{jk} M_{jk} + \sum_{j=1}^m (T_j + W_j G_j) Z_j \quad (1)$$

其中， i 为供应商， j 为铁路物流中心， k 为需求点； d_{ij} 表示供应商 i 到备选铁路物流中心 j 的铁路运输距离； Q_{ij} 表示从供应商 i 到铁路物流中心 j 的铁路运输货物量； E_{ij} 表示铁路运输的单位运输成本； d_{jk} 表示备选铁路物流中心 j 到需求点 k 的公路运输距离； Q_{jk} 表示备选铁路物流中心 j 到需求点 k 的公路运输货物量； E_{jk} 表示公路运输的单位运输成本； T_j 表示备选铁路物流中心 j 的固定建设费用； W_j 表示备选铁路物流中心 j 处理货物的单位成本； G_j 表示备选铁路物流中心 j 处理货物量；

$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{在备选地点 } j \text{ 处建立配送中心} \\ 0, & \text{不备选地点 } j \text{ 处建立配送中心} \end{cases} \quad M_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{配送中心 } j \text{ 对需求点 } k \text{ 进行配送} \\ 0, & \text{配送中心 } j \text{ 不对需求点 } k \text{ 进行配送} \end{cases}$$

4.2. 低碳视角下的铁路物流中心选址成本改进模型

低碳铁路物流中心选址成本计算共分为两部分，一部分是公铁联运运输过程中产生的碳排放成本，另一部分是铁路物流中心产生的碳排放成本。

(1) 运输过程中的物流成本分析

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。参考文献[12]使用碳排放强度方法，具体而言

铁路运输过程中产生的碳排放成本 C_a 可以表示为：

$$C_a = \alpha U_s \sum_{j=1}^m d_{ij} Q_{ij} Z_j \quad (2)$$

其中， α 表示碳税税率， U_s 表示铁路运输的碳排放强度， Z_j 表示布尔变量。

同理，公路运输过程中产生的碳排放成本 C_b 可以表示为：

$$C_b = \alpha O_s \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n d_{jk} Q_{jk} Z_j M_{jk} \quad (3)$$

其中， O_s 表示公路运输的碳排放强度。

综上，公铁联运运输过程中碳排放成本 C_2 可以表示为：

$$C_2 = \alpha \left[U_s \sum_{j=1}^m d_{ij} Q_{ij} Z_j + O_s \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n d_{jk} Q_{jk} Z_j M_{jk} \right] \quad (4)$$

(2) 铁路物流中心的成本分析

铁路物流中心产生的碳排放成本，可以分为固定碳排放成本和变动碳排放成本。

其中固定碳排放成本主要是由于铁路物流中心因为照明，机械作业、制冷、等因素产生的碳排放成本，参考文献[3]铁路物流中心固定碳排放成本 C_c 可以表示为：

$$C_c = \alpha \left(EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} J_j \mu_2 \mu_3 \mu_4 \right) \quad (5)$$

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 $J_j \text{ kg}$; 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 ; 便于计算不考虑实际固碳率。

变动碳排放成本 C_d 主要是由于处理货物产生的碳排放成本, 可以表示为:

$$C_d = \alpha \sum_{j=1}^n Z_j S_j (G_j)^w \quad (6)$$

其中, S_j 表示备选物流中心处理单位货物产生的碳排放量; G_j 表示备选铁路物流中心处理货物量, $(G_j)^w$ 为假设凹函数, w 属于 $\{0,1\}$ 。

综上, 铁路物流中心产生的碳排放成本 C_3 可以表示为:

$$C_3 = \alpha \left[EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} J_j \mu_2 \mu_3 \mu_4 + \sum_{j=1}^n Z_j S_j (G_j)^w \right] \quad (7)$$

根据上述运输过程以及铁路物流中心的碳排放成本, 结合经典的铁路物流中心选址成本, 改进后的低碳铁路物流中心选址总成本可以表示为:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

将式(1)、(4)和(7)代入(8), 可得总成本的目标函数可以表示为:

$$\begin{aligned} \min C = C_1 + C_2 + C_3 \\ = \left[\sum_{j=1}^m d_{ij} Q_{ij} E_{ij} Z_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n d_{jk} Q_{jk} E_{jk} M_{jk} + \sum_{j=1}^m (T_j + W_j G_j) Z_j \right] \\ + \alpha \left[U_s \sum_{j=1}^m d_{ij} Q_{ij} Z_j + O_s \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n d_{jk} Q_{jk} Z_j M_{jk} + EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} J_j \mu_2 \mu_3 \mu_4 + \sum_{j=1}^m Z_j S_j (G_j)^w \right] \end{aligned} \quad (9)$$

考虑到模型中实际存在的一些约束条件, 如铁路物流中心处理货物的能力大于等于供应商提供的货物和所有需求点总的需求量; 铁路物流中心有足够大的仓储能力以满足整个配送系统的要求; 要在规定时间内送达等。具体的约束条件可以表示为:

$$I_i \geq \sum_{j=1}^m Q_{ij} \quad (10)$$

$$X_j \geq I_i + \sum_{k=1}^n Q_{jk} M_{jk} \quad (11)$$

$$Y_j \geq I_i + \sum_{k=1}^n Q_{jk} M_{jk} \quad (12)$$

$$t_{ij} + t_{jk} + t_j \leq t_{\max} \quad (13)$$

式(10)中 I_i 表示供应商的供应能力; $\sum_{j=1}^m Q_{ij}$ 表示所有备选铁路物流中心的需求量; 式(11)中 X_j 表示铁路物流中心的仓储能力; I_i 表示供应商的供应能力; $\sum_{k=1}^n Q_{jk} M_{jk}$ 各需求点货物的总和; 式(12)中 Y_j 表示铁路物流中心处理货物能力; 式(13)中 t_{ij} 表示铁路运输消耗的时间, t_{jk} 表示公路运输消耗的时间, t_j 表示铁路物流中心因处理货物消耗的时间; $t_{\max}$ 表示需求点所要求的时间。

通过考虑碳排放成本情况和不考虑碳排放成本情况进行对比, 引入费用节省率这一概念。其定义为考虑碳排放成本时相比不考虑碳排放成本时节省的成本, 费用节省率可以表示为:

$$F_a = \frac{(F_b - F_c)}{F_b} * 100\% \quad (14)$$

其中, F_a 表示费用节省率; F_b 表示不考虑碳排放成本; F_c 表示考虑碳排放成本。

4.3. 基于禁忌搜索算法的模型求解

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[13]。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 2 所示。

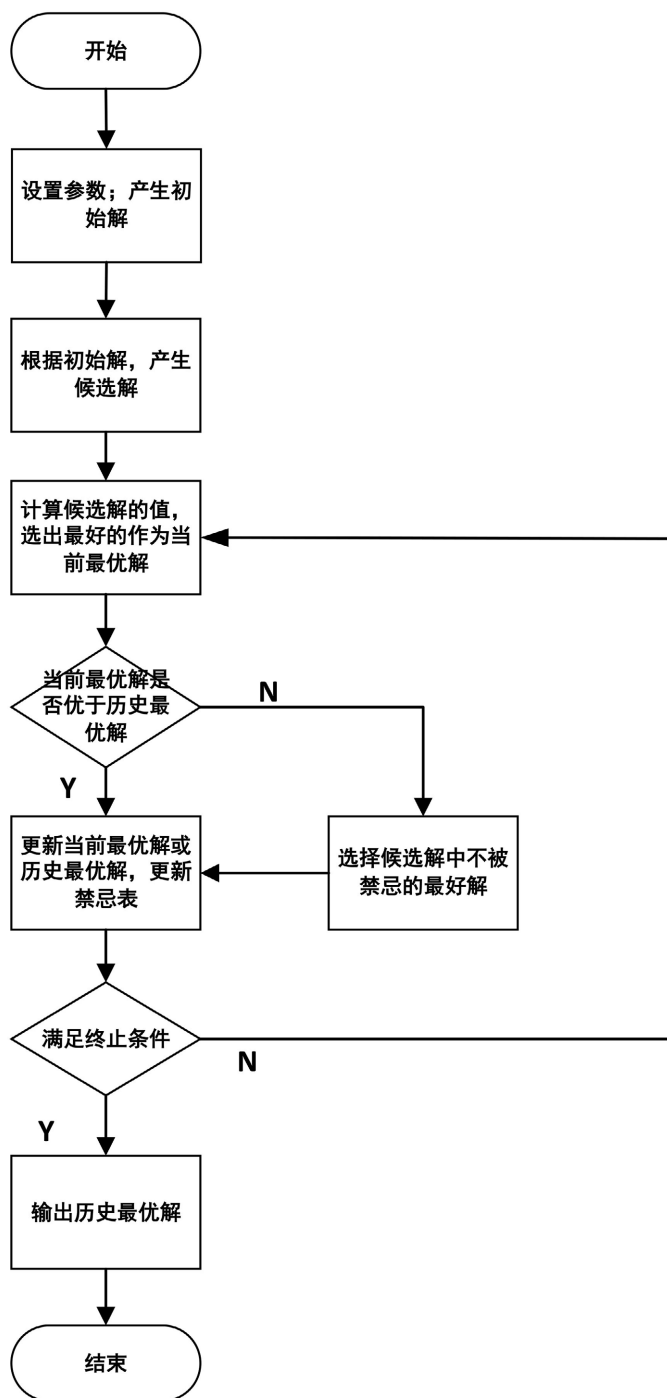


Figure 2. Flowchart of Tabu search algorithm

图 2. 禁忌搜索算法流程图

5. 算例验证及结果分析

5.1. 算例验证

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。已知所有需求点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，根据各需求点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。图 3 为公铁联运选址分布图，主要反映当前沪宁线周边备选铁路物流中心及需求点分布情况。

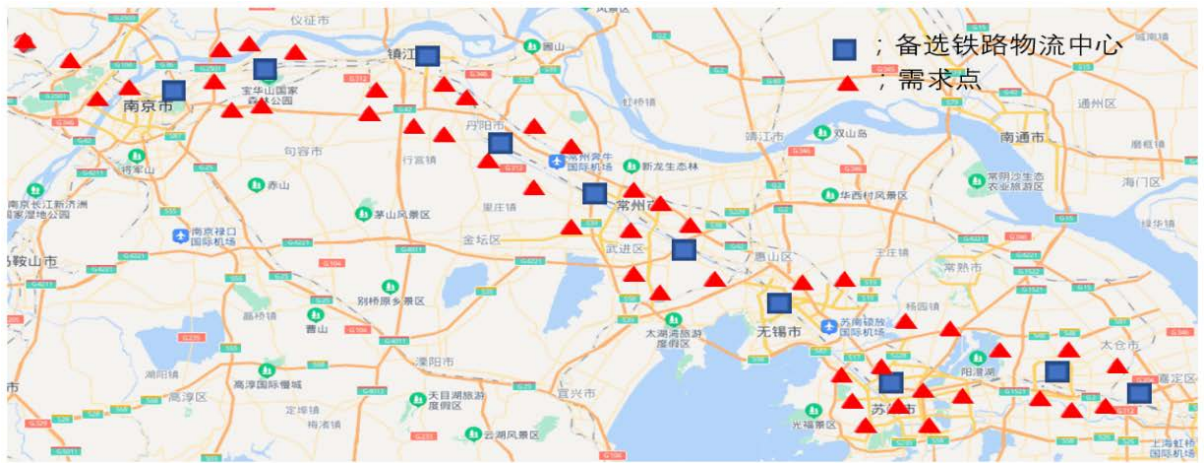


Figure 3. Location layout of rail-highway combined transport
图 3. 公铁联运选址分布图

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，备选铁路物流中心相关信息如表 2 所示。

Table 2. Information of candidate railway logistics center
表 2. 备选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
B1 (安亭站)	121.184836	31.311162	18	1529	122	5.52
B2 (昆山站)	120.963465	31.372021	22	2534	109	2.14
B3 (苏州西站)	120.556039	31.347413	17	1123	140	3.11
B4 (无锡南站)	120.347114	31.553953	30	2312	180	3.23
B5 (戚墅堰站)	120.090935	31.717221	21	2212	163	5.34
B6 (新闻镇站)	119.89369	31.830772	23	3212	160	6.15
B7 (丹阳东站)	119.659082	31.960388	16	2671	134	4.75
B8 (镇江东站)	119.463096	32.198019	25	2831	172	2.11
B9 (龙潭站)	119.064985	32.177166	23	1782	145	9.17
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。表 3 为 46 个零售门店的相关信息。

Table 3. Related information of demand points
表 3. 需求点相关信息

编号	经度	纬度	需求量/t	需求时间/h
N1	121.220014	32.288545	4.7	22
N2	121.224613	31.341854	7.7	20
N3	121.079734	31.316191	9	16
N4	120.927957	31.343828	4.8	24
N5	121.024542	31.434576	1.8	16
N6	120.808374	31.35567	8.6	10
...	...	...	...	...
N44	118.722581	32.133907	8.6	22
N45	118.821466	32.102591	7.1	29
N46	118.561604	32.184772	3.7	23

由于上述地址均为经纬度，在计算两地距离时，本文以欧氏距离为使用距离。各点之间距离如表 4 所示。

Table 4. Distance between points
表 4. 各点之间距离

距离/km	G1	B1	B2	B3	B4	...	N45	N46
G1	0	14	35	76	107	...	/	/
B1	14	0	21	62	93	...	200.88	220.86
B2	35	21	0	41	71	...	140.55	160.90
B3	76	62	41	0	31	...	120.75	140.86
B4	107	93	72	31	0	...	100.69	120.09
...	...	...	...	...	...	...	...	...
N45	/	200.88	140.55	120.75	100.69	...	0	/
N46	/	220.86	160.90	140.86	120.09	...	/	0

公路运输费用参考文献[12]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：

$$p_c = [p_a + p_b \cdot X_k] \times T_t \tag{15}$$

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[15]，具体如表 5 所示。

Table 5. Related data of carbon emission cost
表 5. 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. 结果分析

相关的研究表明, 考虑到禁忌搜索算法相关参数初始值的随机性, 当种群大小为 50、最大迭代次数为 100、禁忌长度为 10、初始禁忌表置为空时, 既可以有效降低算法寻优时间, 又可以尽快得到接近最优解的值, 当迭代次数再增大, 反而不能有效提升算法效果[16]。因此, 选取以上的算法运行参数, 在 MATLAB 进行仿真。其根据 4.1 和 4.2, 配送策略的仿真结果如图 4 和图 5 所示。其中, 正方形表示 10 个备选铁路物流中心, 三角形表示 46 个需求点, 横纵坐标分别表示相关点的经度和纬度。

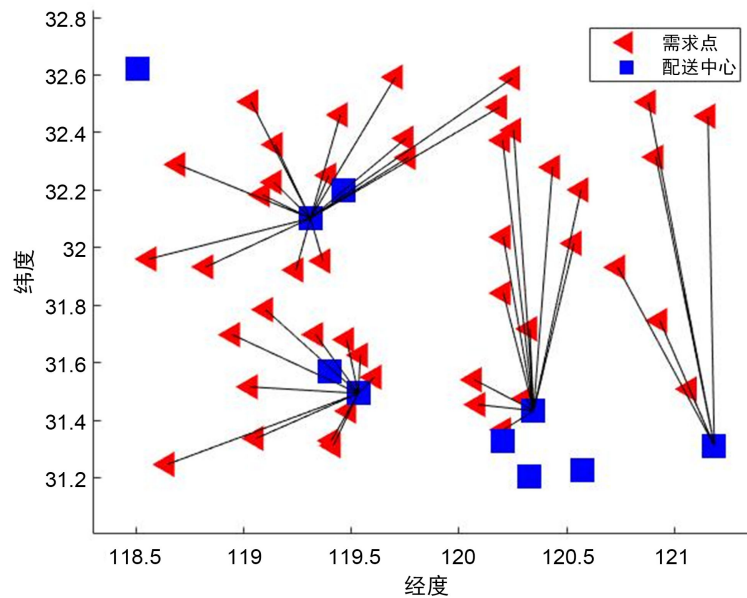


Figure 4. Distribution strategy without carbon emission consideration
图 4. 不考虑碳排放的配送策略

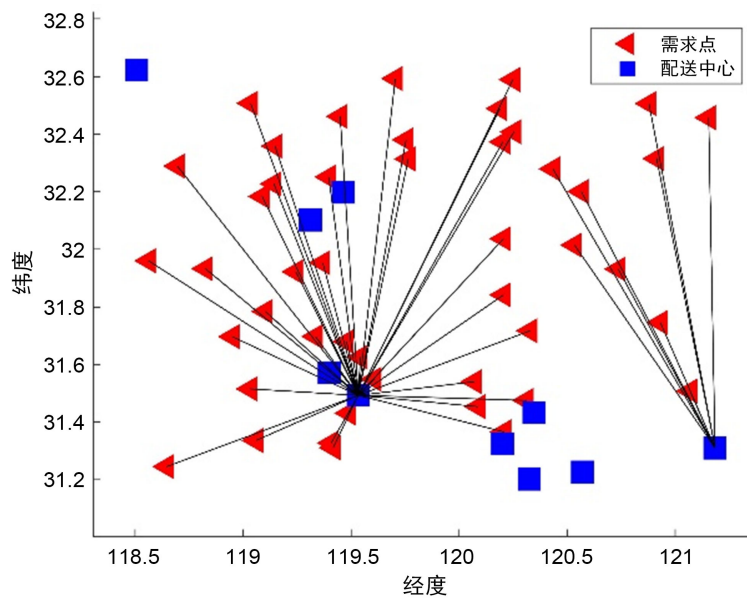


Figure 5. Distribution strategy with carbon emission consideration
图 5. 考虑碳排放的配送策略

当不考虑碳排放成本时，从图 4 可以看出，10 个备选铁路物流中心中选择 4 个改建为最终铁路物流中心，分别为 B1 (安亭站)、B5 (戚墅堰站)、B6 (新闻镇站)、B9 (龙潭站)。当考虑碳排放成本时，由图 5 可以看出，10 个备选铁路物流中心中选择 2 个改建为最终铁路物流中心，分别为 B1 (安亭站)和 B6 (新闻镇站)用来长期服务周边农副产品经销商。

因为启发式算法的随机性，为保证结果的可靠性，参考文献[17]，使用禁忌搜索算法运行 20 次所得到的平均各子成本及占比分析，如表 7 和图 6 所示，从中可以看出：

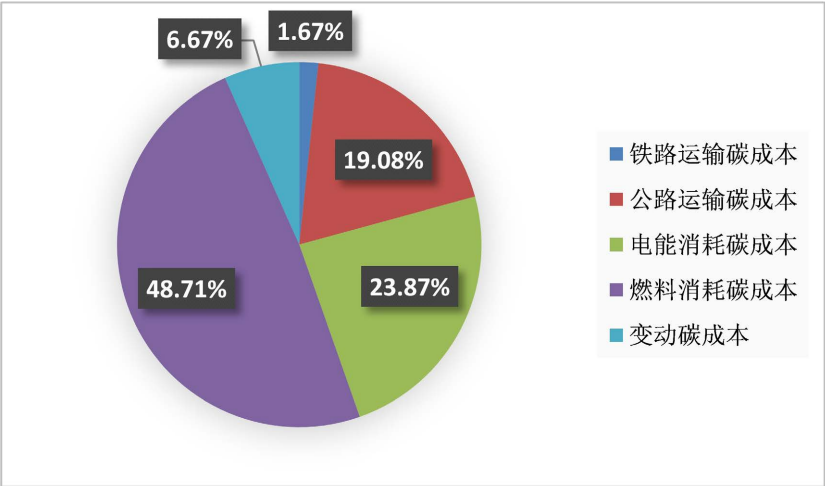


Figure 6. Proportion of carbon emission cost of sub items
图 6. 各子项目碳排放成本占比

当不考虑碳排放成本时，总成本主要是配送中心产生的成本和配送过程产生的成本两部分，其中后者铁路和公路运输两部分占比较大，占总成本的 62.31%。在配送中心产生的成本中，改建成本占比较小为 8.69%，是根据该铁路物流中心预计使用年限，采用平均折旧法将铁路物流中心改建成本分摊到每天的成本。以备选铁路物流中心安亭站为例，假设所有备选铁路物流中心预计使用年限为 10 年，安亭站改建成本为 200 万元，总的改建成本分摊到每天的费用为 547.94 元。因此，铁路物流中心改建成本占比较小。

因此，各备选铁路物流中心分摊后的改建成本如表 6 所示。

Table 6. Apportioned reconstruction cost
表 6. 分摊后的改建成本

编号	改建成本/元	预计使用年限	分摊后的改建成本/元
B1 (安亭站)	2000000	10	547.94
B2 (昆山站)	1400000	10	383.56
B3 (苏州西站)	1400000	10	383.56
B4 (无锡南站)	1400000	10	383.56
B5 (戚墅堰站)	1500000	10	410.96
B6 (新闻镇站)	1200000	10	328.77
B7 (丹阳东站)	1200000	10	328.77
B8 (镇江东站)	800000	10	219.18
B9 (龙潭站)	600000	10	164.38
B10 (兴卫村站)	600000	10	164.38

当考虑碳排放成本时；碳排放成本共有 5 部分组成分别为铁路运输碳成本、公路运输碳成本、电能消耗碳成本、燃料消耗碳成本和变动碳成本，这 5 部分相加为总的碳排放成本，占总成本的 7.05%。其中占比最大的为燃料消耗产生的碳排放成本，占总成本的 3.43%；占比最小的为铁路运输碳排放成本，占总成本的 0.12%。

从表 7 各子成本的分析可以看出，当费用节省率为正值时，表示考虑碳排放成本的情况下成本相对较低；为负值时，表示考虑碳排放成本的情况下成本相对较高。其中，配送中心改建成本费用节省率最高为 39.62%，这是因为考虑碳排放成本的情况下选址数量由 4 个减少到了 2 个，减少的配送中心为 B5 (戚墅堰站)和 B9 (龙潭站)；公路运输成本的费用节省率最低，这是因为当配送中心数量减少时，导致配送路程增加，所以公路运输成本的费用节省率最低。

Table 7. Cost analysis of sub items
表 7. 各子项目成本分析

各类成本/元	不考虑碳排放成本		考虑碳排放成本		费用节省率
	费用	占总成本百分比	费用	占总成本百分比	
配送中心改建成本	1452.04	8.69%	876.71	4.51%	39.62%
配送中心运营成本	4849.8	29.01%	3838.6	19.75%	20.85%
铁路运输成本	4070.36	24.35%	3993.82	20.55%	1.88%
公路运输成本	6346.36	37.96%	9355.66	48.14%	-47.42%
铁路运输碳成本	—	—	22.93	0.12%	—
公路运输碳成本	—	—	261.41	1.35%	—
电能消耗碳成本	—	—	327.05	1.68%	—
燃料消耗碳成本	—	—	667.47	3.43%	—
变动碳成本	—	—	91.46	0.47%	—
总成本	16718.56	100%	19435.11	100%	-16.25%

从图 6 中可以看出，碳排放总成本主要分为配送中心产生的碳排放成本和配送过程产生的碳排放成本两部分，其中配送中心燃料消耗占比最大，占总碳成本的 48.71%，铁路运输占比最小，占总碳成本的 1.67%，而且公路运输碳排放量是铁路运输的 11.43 倍。因此，在国家大力发展绿色低碳背景下，配送中心应该尽量减少燃油消耗量，更多的使用替代能源，如电能或者太阳能；在配送过程中，应该尽量减少公路运输，使用绿色环保的铁路运输，进一步促进物流运输的公转铁。

6. 结论

- 本文基于低碳视角下面向公铁联运的铁路物流中心选址研究，得出以下结论：
- (1) 铁路物流中心选址要考虑的因素比一般物流中心选址要多很多。比如，一般物流中心在选址时只考虑周边公路情况，而铁路物流中心在选址时不仅要考虑周边公路情况还要考虑周边铁路情况。
 - (2) 当不考虑碳排放成本时应该选择 4 个站点作为铁路物流中心。当考虑碳排放成本时应该选择 2 个站点作为铁路物流中心。
 - (3) 铁路物流中心中燃料消耗碳成本占比最大，占总碳成本的 48.71%，所以在国家大力发展绿色低碳背景下，配送中心应该尽量减少燃油消耗量，更多的使用替代能源，比如，电能或者太阳能。
 - (4) 运输过程中公路运输碳排放量是铁路运输的 11.43 倍。因此，配送过程中应该尽量减少公路运输，

更多使用绿色环保的铁路运输。

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] 乔美华, 卞艺杰, 王惠. 物流业能源效率对碳排放的门槛效应分析[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(12): 100-105.
- [2] Huang, L. and Yang, J. (2019) Location-Distribution of Cruise Ship Supply Logistics Distribution Centre Considering Time Window. *Systems Science & Control Engineering*, 7, 338-345. <https://doi.org/10.1080/21642583.2019.1674221>
- [3] 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.
- [4] Wang, S., Tao, F. and Shi, Y. (2018) Optimization of Location-Routing Problem for Cold Chain Logistics Considering Carbon Footprint. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, Article 86. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010086>
- [5] 裴爱晖, 单立, 李涛. 基于运输成本及环境成本的物流园区选址研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(S1): 1-4.
- [6] 吴芳芸, 朱小林. 基于轴辐式理论的冷链物流网络优化模型[J]. 公路交通科技, 2019, 36(6): 144-150.
- [7] 谢海红, 刘瑛. 公铁联运配送方案优化[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 89-93.
- [8] Dam, K., Lukszo, Z., Ferreira, L., et al. (2007) Planning the Location of Intermodal Freight Hubs: An Agent Based Approach. 2007 *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, London, 15-17 April 2007, 187-192. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2007.372774>
- [9] 段华薇, 戴玥, 严余松. 铁路物流中心参与的公铁联运物流服务供应链协调[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1590-1598.
- [10] 王靖添, 马晓明. 中国交通运输碳排放影响因素研究——基于双层次计量模型分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 1133-1142.
- [11] De Oliveira, L.K., dos Santos, O.R., de Oliveira, R.L.M. and de Albuquerque Nóbrega, R.A. (2018) Is the Location of Warehouses Changing in the Belo Horizonte Metropolitan Area (Brazil)? A Logistics Sprawl Analysis in a Latin American Context. *Urban Science*, 2, Article 43. <https://doi.org/10.3390/urbansci2020043>
- [12] 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.
- [13] 付朝晖, 刘长石. 多物流中心共同配送的车辆路径问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(16): 291-298.
- [14] 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.
- [15] 谢静, 林国龙, 何红弟, 周海磊. 模糊需求环境下考虑碳成本的多式联运路径优化[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 173-179.
- [16] 李悦. 基于禁忌搜索算法的双区型仓库货位分配与拣货路径协同优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [17] 康雁, 王海宁, 陶柳, 杨海潇, 杨学昆, 王飞, 李浩. 混合改进的花授粉算法与灰狼算法用于特征选择[J]. 计算机科学, 2022, 49(S1): 125-132.