

文章编号: 1003-1421(2026)08-0064-09

引用格式: 王丹竹, 周凌云, 陈诚, 等. 考虑碳排放的铁路物流储运一体化方案优化模型[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(8): 64-72.
WANG Danzhu, ZHOU Lingyun, CHEN Cheng, et al. Optimization Model for Integrated Railway Logistics Storage and Transportation Scheme Considering Carbon Emissions[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 64-72.

考虑碳排放的铁路物流储运一体化方案优化模型

王丹竹¹, 周凌云², 陈 诚¹, 陈 兵³

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所, 北京 100081; 2. 中国铁路95306技术中心, 北京 100081; 3. 中国铁路广州局集团有限公司 物流事业部, 广东 广州 510450)

摘 要: 在绿色发展与铁路物流市场化改革背景下, 铁路物流企业为客户提供一体化、绿色化的仓储、运输及综合物流服务是重要改革方向之一。借鉴交通物流行业碳排放研究成果, 提出铁路物流服务运输、仓储、装卸业务在不同能源消耗类型下的碳排放计算方法, 以铁路储运一体化方案物流费用及碳排放费用作为双目标优化函数, 采用加权标准化方法建立总目标函数, 并考虑铁公联运与运到时限要求, 构建包含碳排放的铁路物流储运一体化方案优化模型。通过仿真求解验证模型的科学性与适用性, 研究结果显示, 减少铁公联运换装次数对于降低碳排放存在较为显著的影响, 通过协同规划到货时间窗与铁路运输方案, 能够有效降低总物流费用。

关键词: 铁路物流; 储运一体化; 方案设计; 碳排放; 路径优化

中图分类号: U294.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251203003

Optimization Model for Integrated Railway Logistics Storage and Transportation Scheme Considering Carbon Emissions

WANG Danzhu¹, ZHOU Lingyun², CHEN Cheng¹, CHEN Bing³

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. China Railway 95306 Technology Center, Beijing 100081, China; 3. Logistics Division, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou 510450, Guangdong, China)

Abstract: In the context of green development and market-oriented reform of railway logistics, providing customers with integrated and green warehousing, transportation, and comprehensive logistics services is one of the important reform directions for railway logistics enterprises. Drawing on the research results of carbon emissions in the field of transportation and logistics, this paper proposed a carbon emission calculation method for railway logistics service, considering transportation, warehousing, loading, and unloading operations under different energy consumption types. The logistics cost and carbon emission cost of the railway storage and transportation integration scheme were used as dual objective optimization functions, and a weighted standardization method was adopted to establish the overall objective function. Considering the requirements of rail-road intermodal transportation and delivery time limit, a railway logistics storage and transportation integration scheme optimization model that included carbon emissions was constructed. By

收稿日期: 2025-12-03

通信作者: 陈诚(1985—), 男, 山西阳泉人, 中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所研究员。

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ233); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X005); 国家重点研发计划项目(2025YFB4304005)

simulating and verifying the scientificity and applicability of the model, the research results show that reducing the number of rail-road intermodal transportation changes has a significant impact on reducing carbon emissions. By coordinating the planning of arrival time windows and railway transportation schemes, the total logistics costs can be effectively reduced.

Keywords: Railway Logistics; Storage and Transportation Integration; Scheme Design; Carbon Emission; Route Optimization

0 引言

绿色发展是中国式现代化的鲜明特征,为落实国家碳达峰碳中和战略要求,铁路物流企业在提升物流效率、减少物流业碳排放、降低社会物流成本中承担着重要责任。中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)发布《2025年铁路现代物流体系建设工作要点》(铁办〔2025〕11号),深化铁路物流市场化改革,推动铁路物流场站仓储业务发展,为铁路物流企业提升储运一体化服务能力提供了广阔空间。紧密结合“双碳”目标要求,考虑干线运输、装卸搬运、仓储中转的碳排放因素,以储运一体化物流方案的物流费用和碳排放费用最小为目标,建立模型,通过协同优化不同运输方式的运输路径、中转节点、仓储周期等要素,获得最优物流方案,提升铁路物流企业的方案设计能力,并为客户减少碳排放,降低综合物流成本。

在铁路物流碳排放及服务方案设计方面,已开展了丰富研究。特别是碳排放背景下多式联运路径优化研究,成为当前的研究热点。在交通碳排放测算研究方面,焦柳丹等^[1]采用卷积神经网络模型预测了交通运输业碳排放量;赵锐等^[2]基于SBM-Malmquist-Tobit模型研究了铁路运输企业碳排放效率的测度及影响因素。在碳排放背景下路径优化研究方面,黄瑞等^[3]在“双碳”背景下,面向不确定性需求,建立多式联运网络路径优化的双层双目标优化模型,并采用嵌套Frank-Wolfe的MOEA/D算法对模型进行求解和算例验证;魏海蕊等^[4]研究了中欧班列跨境运输碳排放问题,分仓储、运输、转运3个阶段计算碳排放量,根据不同运输方式的碳排放强度,在碳排放最小的目标下优化了中欧班列运输路径;苏航等^[5]通过引入碳税税率参数,构建了以广义费用最小为目标的不确定需求条件下冷藏集装箱多式联运路径优化模型,在广义费用最小与碳排放最低之间寻求最优方案。在储运一体化方案

设计研究方面,陈超等^[6]就智慧物流技术支撑下物流方案储运一体化运作模式展开研究,分析了储运一体化模式的核心要素、关键技术、运作方式,构建了智慧物流储运体系;王健等^[7]基于物联网、大数据、人工智能技术,建立了智慧物流储运一体化仿真模型,通过仿真实验验证了模型的有效性;霍亮^[8]面向火力发电厂煤炭等燃料储运一体化管控系统设计进行研究,提出基于地理信息系统技术的运输导航与存储容器匹配性联动系统设计方案。

既有研究为铁路物流企业储运一体化方案优化和碳排放测算奠定了良好基础,在此基础上,本研究紧密结合铁路物流改革和铁路货运、仓储业务发展实际,综合考虑储运一体化方案经济成本、时间成本(运到时限)等广义费用和绿色环保的碳排放费用,在传统多式联运路径优化模型的基础上,引入运到时限、时间窗、仓储周期、换装次数等参数,构建铁路物流储运一体化方案优化模型,为铁路物流企业提升服务方案设计能力和市场竞争力提供理论与实践参考。

1 铁路物流储运一体化方案设计思路

随着铁路物流市场化改革进程的不断深化,国铁集团打造现代物流中心,建立负责全路物流业务日常运营和组织协调的生产机构,铁路局集团公司设立物流事业部,成立了40个铁路物流中心,实现铁路物流场站的统一管理和市场化经营。铁路物流业务市场化改革,为盘活铁路仓储物流资源,推动铁路物流企业开展第三方物流仓储业务奠定了基础。传统模式下,铁路仓储资源以为客户提供发送端、到达端的仓储暂存业务为主,暂存期内免费使用,超出暂存期按照不同价格收取场地延占费,是一项为保证客户铁路干线运输需求提供的配套服务。市场化模式下,铁路仓储资源在为客户提供暂存服务的基础上,能够进一步拓展与生产企业、流通企业等客户区域仓储需求相匹配的仓储、分拨、

集散服务。使用铁路仓储设施代替客户企业的区域分拨库功能,减少由客户区域分拨中心至铁路物流场站的短驳作业,是铁路物流储运一体化方案设计的前提和基础。通过一体化设计铁路仓库的仓储方案与铁公联运的路径优化方案,有效地将铁路干线运输与仓储服务有机结合、无缝衔接,降低全程物流成本、提升运输时效,是储运一体化方案设计的目标。充分考虑干线运输路径优化、装卸费用、转运时间、仓储费用及时间,建立储运一体化方案模型,是支撑储运一体化方案设计的手段与路径。支撑铁路储运一体化物流方案实施的铁路物流网络架构示意图如图1所示。

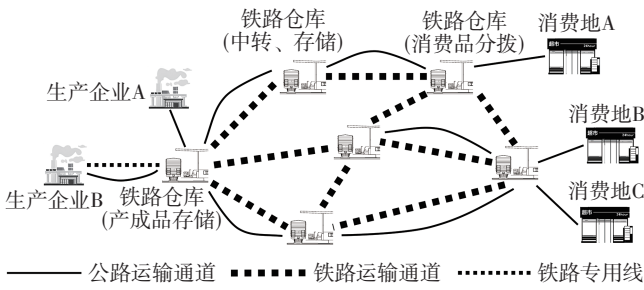


图1 铁路物流网络架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of railway logistics network architecture

图1中铁路物流网络与社会物流网络的核心区别在于,使用铁路仓储设施代替生产企业的产成品存储库和消费地的消费品分拨库,并承担多式联运的转运、存储功能,在物流方案设计时,将货物存储时间与铁路运输时间相协同,形成一体化的仓储运输方案,最大限度提升全程物流时效、降低物流成本。

同时,铁路作为绿色物流发展的骨干性运输通道,在“双碳”行动中承担着重要责任。除仓储、运输经济成本外,综合考虑物流服务碳排放量,为客户节约碳排放配额成本,助力交通物流绿色发展,也是铁路物流储运一体化方案设计的重要原则之一。区别于公路运输,大运能、集约化、绿色化是铁路的竞争优势。实现铁路物流场站仓储设施与客户企业分拨中心的联合设置,减少发、到端的接取送达短驳运输及装卸次数,能够进一步降低短驳、装卸作业的碳排放量。基于上述思路,为提升铁路物流企业服务方案设计能力,秉承依托铁路仓储资源开展仓储、分拨、集散物流业务的理念,构

建考虑碳排放的铁路物流储运一体化方案优化模型,以广义费用最小和碳排放费用最少为目标函数建立模型,获得最优的铁公联运路径优化和仓储节点分配方案。

2 铁路物流储运一体化方案碳排放费用计算

2.1 总碳排放费用计算

铁路物流储运一体化方案的总碳排放量包括铁路运输、公路运输、节点仓储及装卸3部分的碳排放。不同物流过程的碳排放量计算,除考虑载运工具、仓储设施、装卸设备单位作业量的能源消耗量以外,还进一步考虑能源类型及能源来源,如消耗电能的作业装备,需考虑电能来源于火电、水电、风电和太阳能等形式。目标函数由包含运输作业碳排放量、中转节点装卸作业碳排放量、起点终点装卸作业碳排放量和仓储作业碳排放量的总和与碳排放收费参数之积组成。总碳排放费用最小的目标函数如下。

$$F_1 = \min \left(\sum_{i \in N, i \neq d} \sum_{u \in U} q \cdot c_e^u \cdot x_{i, i+1}^u + \sum_{i \in N, i \neq o} \sum_{u \in U} q \cdot c_e^{u+1} \cdot y_i^{u+1} + q \cdot c_e^{u+1} + \sum_{i \in \{o, d\}} q \cdot c_e^i \cdot t \right) \cdot c_e \quad (1)$$

式中: F_1 表示铁路物流储运一体化方案的总碳排放费用,元。

公式中符号说明如表1所示。

2.2 公路运输碳排放强度

公路运输碳排放强度主要与使用的运输车辆类型(汽油、柴油、电动货车等)、道路路况及拥堵情况(高速公路、普通公路、城市内道路等)、载重量(轻型货车、中型货车、重型货车等)等因素相关。计算方法如下。

$$c_e^1 = \varepsilon_k \cdot E_k^1 \quad (2)$$

式中: ε_k 表示不同类型能源的碳排放因子,取 $k = 1, 2, 3$, 在本模型中分别代表汽油、柴油和电力,根据周韵梓^[9]研究结果、生态环境部公布的2024年全国电力平均碳足迹因子^[10],取汽油碳排放因子 $\varepsilon_1 = 2.9251 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$,柴油碳排放因子 $\varepsilon_2 = 3.0959 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$,电力碳排放因子 $\varepsilon_3 = 0.5777 \text{ kgCO}_2/(\text{k} \cdot \text{Wh})$; E_k^1 表示公路运输使用第 k 种能源单位运输重量及里程的能源消耗强度, $\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$

表1 符号说明
Tab.1 Symbol description

类型	符号	说明
集合	N	铁路物流网络节点集合
	U	运输方式的集合
参数	i	铁路物流网络节点, $i \in N$
	$i-1$	节点 i 的前置节点
	$i+1$	节点 i 的后置节点
	o	起点
	d	终点
	u	采用的运输方式, $u \in U$, u 只作为标记符号, 不计算其实际数值, 本研究只包含2种运输方式, 其中, $u = \text{I}$ 代表公路运输, $u = \text{II}$ 代表铁路运输
	$u-1$	u 的前置运输方式
	$u+1$	u 的后置运输方式
	$x_{i,i+1}^u$	0-1 变量, $x_{i,i+1}^u = 1$ 表示货物采用运输方式 u 从节点 i 到节点 $i+1$, 否则 $x_{i,i+1}^u = 0$
	y_i^{uu+1}	0-1 变量, $y_i^{uu+1} = 1$ 表示在节点 i 处, 货物的运输方式由 u 转换为 $u+1$, 否则 $y_i^{uu+1} = 0$
常量	q	货运量, t
	c_e^u	运输方式 u 的碳排放量强度, $\text{kgCO}_2/(\text{t} \cdot \text{km})$, 在后续研究中采用 c_e^{I} 表示公路运输碳排放强度, c_e^{II} 表示铁路运输碳排放强度
	c_e^i	在发送端和到达端进行仓储作业时的碳排放量强度, $\text{kgCO}_2/(\text{t} \cdot \text{h})$, $i \in \{o, d\}$
	c_e^{uu+1}	在节点发送、中转、到达时单位货物进行一次装卸作业的碳排放量强度(kgCO_2/t), 包括一次装车作业和一次卸车作业, 其中, 起点的一次装车作业与终点的一次卸车作业按照一个 c_e^{uu+1} 计算
	c_e	碳税收费参数, 元/ kgCO_2

或 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{t} \cdot \text{km})$, E_k^{I} 与能源消耗的货车种类相关, 根据《营运货车燃料消耗量限值及测量方法》(JT/T 719—2025)综合燃料消耗量限值规定, 并结合张雨^[11]、吴彪等^[12]、马劲超等^[13]的研究结果, 对不同载重量、不同能源类型货车能源消耗强度参考值进行估算, 柴油密度按照 $0.85 \text{ g}/\text{cm}^3$ 折算, 本模型考虑公路运输速度为 $80 \text{ km}/\text{h}$ 的高速公路运输, 在选取车辆载重量进行换算时取相关文件规定中的上限重量。

不同类型货车能源消耗强度如表2所示。

2.3 铁路运输碳排放强度

铁路运输碳排放强度主要与机车牵引类型、载重量等因素相关, 计算公式如下。

$$c_e^{\text{II}} = \varepsilon_k \cdot E_k^{\text{II}} \quad (3)$$

式中: E_k^{II} 表示铁路运输使用第 k 种能源单位运输重量及里程的能源消耗强度, 由于铁路内燃机车主要采用柴油作为燃料, 电力机车采用电力作为动力, 因

表2 不同类型货车能源消耗强度
Tab.2 Energy consumption intensity of different types of trucks

车辆总质量 T/t	能源类型	本模型设定载重量 (取上限)/t	能源消耗强度
$3.5 < T \leq 4.5$	柴油	4.5	11.8 L/100 km
$4.5 < T \leq 8$	柴油	8	16.6 L/100 km
$8 < T \leq 12$	柴油	12	19.1 L/100 km
$12 < T \leq 18$	柴油	18	22.1 L/100 km
$18 < T \leq 25$	柴油	25	28.6 L/100 km
$25 < T \leq 31$	柴油	31	30.7 L/100 km
$T=20$	电力	20	170 $\text{k} \cdot \text{Wh}/100 \text{ km}$

此能源类型仅考虑柴油和电力的能源消耗强度, $\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 或 $\text{k} \cdot \text{Wh}/(\text{t} \cdot \text{km})$, 铁路快运货物干线运输基本使用电力机车牵引, 根据马劲超等^[13]的参数设置情况, 取电力机车能源消耗强度为 $107.94 \text{ k} \cdot \text{Wh}/(\text{万} \text{ t} \cdot \text{km})$ 。

2.4 节点仓储及装卸碳排放强度

物流节点碳排放强度主要与节点的装卸作业(含装卸间短驳作业)、仓储作业能源消耗类型相关, 铁路快运货物装卸作业通常采用叉车、托盘进行集装化装卸(短驳)作业, 叉车消耗汽油、柴油或电力; 存储条件需要非露天仓储设施, 通常为线边库、雨棚或独立物流仓库, 仓库照明、通风、温湿度控制、安全监控等作业主要消耗电力。由于叉车、仓库通常多批次货物同时作业, 对于每一批次货物的作业碳排放量计算较为困难, 因此采用物流节点装卸、短驳、仓储碳排放总量除以作业总量的思路, 测算单位货物的节点碳排放量, 根据全球物流排放理事会 (Global Logistics Emissions Council)^[14]的调研及测算结果, 选取装卸(短驳)作业碳排放强度为 $2.1 \text{ kgCO}_2/\text{t}$, 仓储作业碳排放强度为 $17.5 \text{ kgCO}_2/(\text{t} \cdot \text{d})$ 。

2.5 碳排放费用计算

铁路物流储运一体化方案优化模型以广义费用最小和碳排放最少为目标, 将碳排放情况纳入目标函数, 引入碳税机制将碳排放量转化为经济成本, 碳税收费情况以 c_e 表示, 元/ kgCO_2 。根据上海环境能源交易所统计的2024年全国碳市场综合价格行情及成交信息, 最高价为 $106.02 \text{ 元}/\text{t}$, 最低价为 $69.67 \text{ 元}/\text{t}$, 考虑到全球气候变暖压力日趋增大, 未来碳排放约束将进一步收紧, 在此取最高价格 $106.02 \text{ 元}/\text{t}$ 作为碳交易费用折算系数。

3 铁路物流储运一体化方案优化模型构建

3.1 物流费用目标函数设计

物流费用最小的目标函数

$$F_2 = \min \left(\sum_{i \in N, i \neq d} \sum_{u \in U} q \cdot c_{ii+1}^u \cdot x_{ii+1}^u + \sum_{i \in N, i \neq o} \sum_{u \in U} q \cdot c_i^{uu+1} \cdot y_i^{uu+1} + c_{od} \cdot q + c_d^z \cdot q \cdot \max(T_{\min} - T_d^u, 0) + c_d^w \cdot q \cdot \max(T_d^u - T_{\max}, 0) \right) \quad (4)$$

$$T_{i+1}^u = \begin{cases} T_o^u + t_{ii+1}^u \cdot x_{ii+1}^u & i = o \\ ST_{ii+1}^u + t_{ii+1}^u \cdot x_{ii+1}^u & i \neq o, d \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_2 表示从起点到终点完成货物物流服务费用最小的目标函数, 元; c_{ii+1}^u 表示采用运输方式 u 将货物由节点 i 运到节点 $i+1$ 的单位运输费用, 元/t; c_i^{uu+1} 表示在节点 i 由运输方式 u 中转为运输方式 $u+1$ 的单位装卸费用(包含1次卸车、1次装车), 元/t; c_{od} 表示在起点 o 和终点 d 的单位装卸费用之和(包含1次装车、1次卸车), 元/t; c_d^z 表示货物早于时间窗下限到达终点的单位仓储费用, 元/(t·h); c_d^w 表示货物晚于时间窗上限到达终点的单位惩罚费用, 元/(t·h); T_o^u 表示货物采用运输方式 u 在起点 o 的起运时刻; T_i^u 表示货物采用运输方式 u 到达节点 i 的时刻, 由公式(5)计算; T_d^u 表示货物采用运输方式 u 到达终点 d 的时刻; ST_{ii+1}^u 表示采用运输方式 u 由节点 i 到节点 $i+1$ 的出发时刻; $[T_{\min}, T_{\max}]$ 表示货物到达终点 d 的运到时限时间窗; t_{ii+1}^u 表示采用运输方式 u 将货物由节点 i 运输到节点 $i+1$ 的运输时间, h; T_o 表示货物在起点 o 开始运输的时刻。

3.2 总模型构建

碳排放费用最小和物流费用最小的2个目标函数, 已经构成双目标优化问题, 为求解该双目标优化问题, 采用标准化加权求和法^[15], 构建总模型, 将双目标优化问题转化为单目标优化问题。分别计算当物流费用最小时碳排放费用目标函数的数值 F'_1 和碳排放费用最小时物流费用函数的数值 F'_2 , 然后利用 F'_1 和 F'_2 分别对碳排放费用目标 F_1 和物流费用目标 F_2 进行标准化, 以达到消除2个目标函数在数量级上的差异, 最后将两者加权相加, 获得单目标优化模型的总目标函数。

建立铁路物流储运一体化方案优化模型后, 通

过求解该模型, 可以获得最优的铁路物流仓储、运输方案。在图1的铁路物流网络中, 假设铁路物流网络节点间通过公路或铁路相连, 节点作业能力与通道能力无限制; 研究聚焦于铁路快运货物, 只考虑公路、铁路2种运输方式; 货物整体运输, 不拆分, 运输过程无货损货差, 无运输事故; 货物在运输过程中进行运输方式转换时的货物暂存服务, 不收取仓储费用; 货物只在发货地、收货地进行仓储服务时收取仓储费用; 到货时间晚于到达时间窗上限时, 收取延迟惩罚费用, 且延迟惩罚费用单价高于仓储费用单价。

总目标函数

$$F = \min \left(\omega_1 \cdot \frac{F_1}{F'_1} + \omega_2 \cdot \frac{F_2}{F'_2} \right) \quad (6)$$

约束条件

$$\sum_{u \in U} x_{ii+1}^u \leq 1 \quad \forall i \in N, i \neq d \quad (7)$$

$$\sum_{u \in U} y_i^{uu+1} \leq 1 \quad \forall i \in N, i \neq o \quad (8)$$

$$\sum_{u \in U} x_{ii+1}^u - \sum_{u \in U} x_{i-1i}^{u-1} = \begin{cases} 1 & i = o \\ -1 & i = d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{i-1i}^{u-1} \cdot x_{ii+1}^u = y_i^{u-1u} \quad \forall i \in N, i \neq o, d; \forall u \in U \quad (10)$$

$$x_{ii+1}^u \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, i \neq d; \forall u \in U \quad (11)$$

$$y_i^{uu+1} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, i \neq o; \forall u \in U \quad (12)$$

$$q \geq 0 \quad (13)$$

$$c_d^z < c_d^w \quad (14)$$

式中: ω_1 表示碳排放费用目标函数的权重, $\omega_1 \geq 0$; ω_2 表示物流费用目标函数的权重, $\omega_2 \geq 0$, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

公式(6)表示模型的总目标函数; 公式(7)表示在铁路物流网络中任意2个节点之间, 只通过1种运输方式运输; 公式(8)表示货物在任意节点仅进行1次中转; 公式(9)用来保证由起点 o 到终点 d 运输路径的完整性; 公式(10)用于保证中转节点前后运输方式转换的一致性; 公式(11)—(12)表示0-1决策变量的取值范围; 公式(13)表示货物运输量为非负数; 公式(14)表示货物到达延迟惩罚费用高于货物仓储费用。

3.3 案例设计

以成都到北京的铁路快运货物物流服务为例, 验证模型的可行性。构建包含13个节点的铁路物

流网络，案例研究铁路物流网络示意图如图2所示。为简化表述，图2中数字代表节点序号，文字代表节点名称。

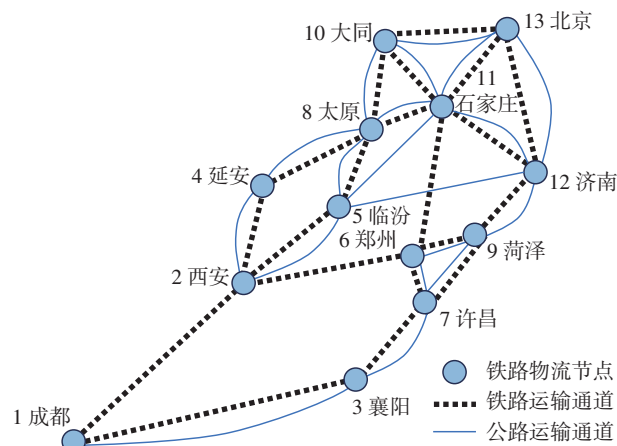


图2 案例研究铁路物流网络示意图
Fig.2 Schematic diagram of railway logistics network for case study

为体现铁路物流网络以铁路通道为骨干的特性，在成都、西安、郑州、石家庄等长距离、大节点之间，铁路物流企业仅提供铁路运输方式，在部分铁路运输方式连通性较差的节点之间，仅能够提供公路运输方式。物流网络路径参数如表3所示。假设有一批重量为320 t的货物由图1中起始节点1，运输到终到节点13，公路运费为0.45元/(t·km)，铁路运费为0.35元/(t·km)^[16]；公路运输速度为80 km/h，铁路运输速度为60 km/h；铁路物流节点仓储费用为0.06元/(t·h)；装卸费为4.0元/t(包含1次装车、1次卸车)；为保证运到时限，将晚于终点运到时限时间窗上限到达的货物单位惩罚费用设定为远高于仓储费用的100.00元/(t·h)；起点运输时间为00:00，终点运到时限时间窗为第二天[03:00—05:00]。在测算物流方案碳排放时，假设公路运输车辆消耗能源为柴油，采用31 t重型货车运输，铁路快运列车消耗能源为电力，装卸设备消耗能源为柴油，仓库消耗能源为电力，计算可得公路运输碳排放强度为0.026 kgCO₂/(t·km)，铁路运输碳排放强度为0.006 kgCO₂/(t·km)，装卸作业碳排放强度为2.1 kgCO₂/t，仓储碳排放强度为17.5 kgCO₂/(t·d)。假设碳排放费用目标函数权重 $\omega_1 = 0.1$ ，物流费用目标函数权重 $\omega_2 = 0.9$ 。

3.4 结果分析

采用孙岩等^[17]研究成果将非线性条件转化为线

表3 物流网络路径参数
Tab.3 Logistics network path parameters

起点	终点	距离/km	公路运输 时间/h	铁路运输 时间/h	运输方式 (1公路, 2铁路)
1	2	780	—	13.0	2
1	3	1 002	12.5	16.7	1, 2
2	4	300	3.8	5.0	1, 2
2	5	360	4.5	6.0	1, 2
2	6	480	—	8.0	2
3	7	318	4.0	5.3	1, 2
4	8	420	5.3	7.0	1, 2
5	8	270	3.4	4.5	1, 2
5	11	430	5.4	—	1
5	12	580	7.3	—	1
6	11	420	—	7.0	2
6	9	210	2.6	3.5	1, 2
7	6	102	1.3	1.7	1, 2
7	9	240	3.0	4.0	1, 2
8	10	288	3.6	4.8	1, 2
8	11	228	2.9	3.8	1, 2
9	12	258	3.2	4.3	1, 2
10	11	348	4.4	5.8	1, 2
10	13	348	4.4	5.8	1, 2
11	10	348	4.4	5.8	1, 2
11	13	288	3.6	4.8	1, 2
12	11	342	4.3	5.7	1, 2
12	13	456	5.7	7.6	1, 2

性条件的方法，将目标函数与约束条件中非线性部分转化为线性规划，使用Lingo 21.0(教育版)分支界定法求解，即可获得考虑碳排放的铁路物流储运一体化方案。将双目标函数转化为单目标函数时，需要对目标函数 F_1 和 F_2 进行标准化，在不同场景下，先求得在另一目标最优时的当前目标函数的取值 F'_1 和 F'_2 ，再代入公式(6)，求得3种不同场景的单目标函数表达式。不同场景下铁路物流方案模型求解结果如表4所示。

第一种场景：算例参数设定意在体现公路运输时效快于铁路运输时效的特征，为满足终点运到时限时间窗要求，模型在最优运费、最少时间与最少惩罚费用之间寻求平衡，需要依赖公路运输的高时效性，采用铁公联运来减少全程运输时间，以满足时间窗要求。由于铁路路网的连通性限制，节点5至节点11之间，通过铁路运输的时间显著大于公

表4 模型求解结果
Tab.4 Model solution results

参数设置	途经节点及运输方式	仓储情况	碳排放费用/万元	总费用/万元
3.3节参数	1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{公}}$ 11 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 13	晚于时间窗0.2 h到达, 无需仓储, 需支付惩罚费用6 400元	0.09	23.30
到货时间窗调整为第二天[08:00—12:00]	1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 8 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 11 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 13	时间窗内到达, 无需仓储	0.05	21.75
到货时间窗调整为第二天[12:00—16:00]	1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 8 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 11 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 13	早于时间窗到达, 需在节点13进行仓储3.9 h	0.06	21.77

路运输时间, 模型求解结果, 采用公路运输作为两节点之间的运输方式, 能够有效降低全程运输时间。此时, 获得的最优物流方案为铁路与公路运输相配合, 略晚于运到时限时间窗(0.2 h)到达的折中方案。

第二种场景: 算例其他参数不变, 将终点运到时限时间窗调整为第二天[08:00—12:00], 此时, 物流方案对于运输时效性要求降低, 铁路运输优势提升, 模型求解获得的全程铁路运输方案, 在运到时限时间窗内到达, 无需支付仓储费用。求解结果显示, 如果物流企业合理设置运到时限时间窗, 总费用可以由 23.30 万元降低为 21.75 万元, 降低 6.65%; 碳排放费用可以降低 44%, 充分反映了铁路货运的绿色效能。同时, 仿真结果体现出在开展铁路物流总包服务时, 铁路物流企业与客户企业科学商定运到时限的重要性, 最优的物流方案不一定是全程时间最短、运输速度最快的物流方案, 而应该是在可接受的时限范围内, 通过物流过程的稳定性、均衡性, 有效保障客户企业安全库存的经济方案^[18]。

第三种场景: 算例其他参数不变, 将终点运到时限时间窗进一步推后, 调整为第二天[12:00—16:00], 此时, 采用运输费用最小的物流方案时, 货物将提前到达终点, 需要在节点 13 进行仓储作业。与运输费用、惩罚费用相比, 仓储费用相对经济, 在仓储 3.9 h 的情况下, 总物流费用为 21.77 万元, 仅比第二种情况增加了 0.09%。求解结果说明, 利用铁路物流节点来进行到达端客户的仓储服务, 将铁路物流仓储设施与客户企业分拨库联合设置, 能够很好地控制企业的物流成本, 且增加到达端企业库存的稳定性, 有效防止缺货。这也是未来铁路物流企业着力推动储运一体化物流方案设计和

为客户企业提供运仓配一体化物流服务的初衷^[19]。

此外, 当客户对运到时限服务要求逐步提高时, 物流方案在公路、铁路 2 种运输方式之间会进行权衡, 将牺牲一定的经济成本, 采用公路运输代替铁路运输, 以提高运输时效性。特别是当惩罚费用处于[50, 100]区间时, 影响效果最为明显, 不同惩罚费用取值时物流方案的变化趋势如图 3 所示。

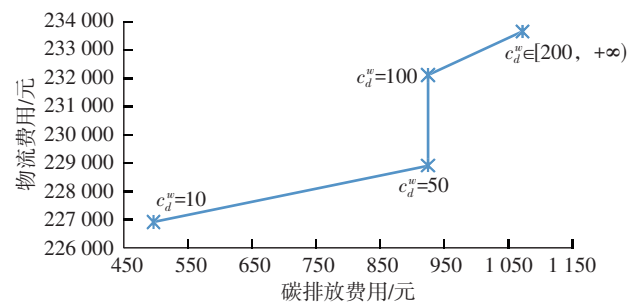


图3 不同惩罚费用取值时物流方案的变化趋势
Fig.3 Variation trend of logistics schemes under different penalty cost values

考虑到权重设计的主观因素对仿真结果的影响, 分别对不同权重取值的结果进行了分析, 权重设计对结果的影响分析如表 5 所示。当权重 $\omega_1 \leq 0.23$ 时, 求解结果稳定于 1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{公}}$ 11 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 13 不变, 当 $\omega_1 \geq 0.25$ 时, 求解结果稳定于 1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 8 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 11 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 13 不变; 当 $\omega_1 = 0.24$ 时, 出现 1 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 2 $\xrightarrow{\text{铁}}$ 5 $\xrightarrow{\text{公}}$ 8 $\xrightarrow{\text{公}}$ 11 $\xrightarrow{\text{公}}$ 13 的折中结果。其主要原因在于, 铁路运输方式的选择, 能够降低碳排放费用, 但较公路而言时效性较差, 会增加延迟到达的风险和成本。碳排放费用权重越大, 选择铁路的可能性越大, 因此当 $\omega_1 \geq 0.25$ 时, 方案就稳定在全程铁路运输。

表5 权重设计对结果的影响分析
Tab.5 Analysis of impact of weight design on results

参数设置	权重取值	途经节点及运输方式	仓储情况
3.3节参数	$\omega_1 < 0.1, \omega_2 > 0.9; \omega_1 = 0.1, \omega_2 = 0.9$ $\omega_1 = 0.2, \omega_2 = 0.8; \omega_1 = 0.23, \omega_2 = 0.77$	铁 铁 公 铁 1→2→5→11→13	晚于时间窗0.2 h到达, 无需仓储, 需支付惩罚费用6 400元
	$\omega_1 = 0.24, \omega_2 = 0.76$	铁 铁 公 公 公 1→2→5→8→11→13	晚于时间窗1 h到达, 无需仓储, 需支付惩罚费用3.2万元
	$\omega_1 = 0.25, \omega_2 = 0.75; \omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.7$ $\omega_1 = 0.4, \omega_2 = 0.6; \omega_1 > 0.4, \omega_2 < 0.6$	铁 铁 铁 铁 铁 1→2→5→8→11→13	晚于时间窗3.1 h到达, 无需仓储, 需支付惩罚费用9.92万元

4 结束语

研究综合考虑碳排放费用与物流费用^[20], 构建双目标优化模型, 对不同场景下铁路物流方案展开优化研究, 形成主要结论如下。①在合理设计运到时限时间窗的情况下, 其他条件不变时能够有效降低总成本(6.64%)和碳排放费用(44%); ②将客户仓库与铁路仓库联合设置, 用铁路仓储设施代替客户分拨中心, 能够有效降低物流成本, 提升铁路物流企业的竞争力。未来研究需考虑全国范围铁路物流网络仿真的计算规模, 设计更加高效的启发式算法, 提升模型求解速度, 以实现铁路物流方案的快速更新、实时响应。

参考文献:

[1] 焦柳丹, 刘莹, 吴雅, 等. 基于卷积神经网络的交通运输业碳排放预测研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(8): 49-57.
JIAO Liudan, LIU Ying, WU Ya, et al. Transportation Carbon Emission Prediction Based on Convolutional Neural Network[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(8): 49-57.

[2] 赵锐, 赵伟杰, 熊欣, 等. 基于SBM-Malmquist-Tobit模型的铁路运输企业碳排放效率测度及影响因素分析[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(6): 11-23.
ZHAO Rui, ZHAO Yijie, XIONG Xin, et al. Measurement of Carbon Emission Efficiency and Analysis of Influencing Factors in Railway Transportation Enterprise Based on SBM-Malmquist-Tobit Model[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(6): 11-23.

[3] 黄瑞, 赵旭, 王婧贇. “双碳”背景下考虑需求不确定的多式联运网络设计优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025(6): 1-12.
HUANG Rui, ZHAO Xu, WANG Jingyun. Intermodal Transportation Network Design Optimization Considering

Demand Uncertainty under “Dual Carbon” Background[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025(6): 1-12.

[4] 魏海蕊, 郭思嘉. 中欧集装箱多式联运物流碳排放量测算研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(9): 3880-3893.
WEI Hairui, GUO Sijia. Calculation of Carbon Emissions of China-Europe Container Multimodal Transport Logistics[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(9): 3880-3893.

[5] 苏航, 李海军. 不确定需求下冷藏集装箱低碳多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(1): 61-69.
SU Hang, LI Haijun. Route Optimization on Low-Carbon Multimodal Transport of Refrigerated Containers under Uncertain Demand[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(1): 61-69.

[6] 陈超, 黎俊, 陆银悦. 智慧物流储运一体化的理论框架与思考[J]. 铁路采购与物流, 2025, 20(10): 55-57.

[7] 王健, 王红莹. 基于智慧物流储运一体化的油码头储运管理模式优化[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(6): 136-138.
WANG Jian, WANG Hongying. Optimization of Storage and Transportation Management Mode of Oil Terminal Based on Intelligent Logistics Storage and Transportation Integration[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2025, 51(6): 136-138.

[8] 霍亮. 火力发电厂燃料储运一体化管控系统设计[J]. 技术与市场, 2024, 31(10): 72-75.

[9] 周韵梓. 交通运输业碳排放系统仿真及减排路径研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[10] 生态环境部, 国家统计局, 国家能源局. 关于发布2024年电力碳足迹因子数据的公告[R]. 北京: 生态环境部, 国家统计局, 国家能源局, 2025.

[11] 张雨. 山西省交通运输业实现碳达峰、碳中和情景分析[D]. 太原: 中北大学, 2023.

[12] 吴彪, 张涵逊, 庞然, 等. 黑龙江省公路运输碳排放多情景预测[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(12): 4874-4887.

- WU Biao, ZHANG Hanxun, PANG Ran, et al. Multi-Scenario Analysis of Carbon Emissions from Highway Transportation in Heilongjiang Province[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(12): 4874-4887.
- [13] 马劲超, 高子涵, 商霖, 等. 典型物流企业广义碳排放成本计算模型[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(10): 95-104.
- MA Jinchao, GAO Zihan, SHANG Lin, et al. Calculation Model for Generalized Carbon Emission Costs of Typical Logistics Enterprises[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 95-104.
- [14] Global Logistics Emissions Council. Global Logistics Emissions Council Framework V3.0[R]. Amsterdam: Smart Freight Centre, 2023.
- [15] 孙岩, 虞楠, 董坤祥. 危险品公铁联运模糊多目标路径优化研究[J]. 河南科学, 2021, 39(5): 772-781.
- SUN Yan, YU Nan, DONG Kunxiang. Fuzzy Multi-Objective Optimization for the Hazardous Materials Road-Rail Multimodal Routing Problem[J]. Henan Science, 2021, 39(5): 772-781.
- [16] 陈娅娜, 肖睿, 黄玮青, 等. 适应现代物流竞争的铁路与公路货运比价关系研究[J]. 铁路物流, 2025, 43(1): 19-24, 39.
- CHEN Yana, XIAO Rui, HUANG Weiqing, et al. Railway and Highway Freight Rate Comparison for Modern Logistics Competition[J]. Railway Logistics, 2025, 43(1): 19-24, 39.
- [17] 孙岩, 虞楠, 王丹竹, 等. 考虑多类型时间窗的集装箱多式联运路径双目标优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(10): 82-89.
- SUN Yan, YU Nan, WANG Danzhu, et al. Study on the Bi-Objective Optimization for the Multimodal Routing Problem with Multiple Time Windows[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(10): 82-89.
- [18] 徐东旭, 王玉光, 朱晔, 等. 面向白货公铁竞争的货运价格监测方法研究[J]. 铁路物流, 2025, 43(1): 12-18.
- XU Dongxu, WANG Yuguang, ZHU Ye, et al. Freight Price Monitoring Methods Based on Highway and Railway Competition of Non-Bulk Goods[J]. Railway Logistics, 2025, 43(1): 12-18.
- [19] 罗莹, 黄玮青, 陈娅娜, 等. 铁路货运承运清算模式下运价高出部分对非国铁运输企业的影响分析[J]. 铁路物流, 2025, 43(4): 23-27.
- LUO Ying, HUANG Weiqing, CHEN Yana, et al. Impact of Freight Rate Excess on Non-National Railway Transportation Enterprises under Carrier-Based Settlement Mode of Railway Freight Transport[J]. Railway Logistics, 2025, 43(4): 23-27.
- [20] 陈进杰, 王国翠, 陈龙, 等. 地铁建设阶段碳排放快速测算方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(10): 105-111, 140.
- CHEN Jinjie, WANG Guocui, CHEN Long, et al. Research on Rapid Estimation Methods for Carbon Emissions During Subway Construction Phase[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 105-111, 140.

(责任编辑 金晶)

(上接第63页)

- 35(9): 81-94.
- [54] VERWEIJ S, NOY C. Set-Theoretic Methods for the Social Sciences: A Guide to Qualitative Comparative Analysis[J]. International Journal of Social Research Methodology, 2013, 16(2): 165-169.
- [55] STOKKE O S. Qualitative Comparative Analysis, Shaming, and International Regime Effectiveness[J]. Journal of Business Research, 2007, 60(5): 501-511.
- [56] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向[J]. 管理学报, 2019, 16(9): 1312-1323.
- ZHANG Ming, DU Yunzhou. Qualitative Comparative Analysis (QCA) in Management and Organization Research: Position, Tactics, and Directions[J]. Chinese Journal of Management, 2019, 16(9): 1312-1323.
- [57] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一条新道路[J]. 管理世界, 2017, 33(6): 155-167.

(责任编辑 魏然)