文章编号:1673-0291(2026)01-0208-09 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250030

面向“公转铁”的域外仓选址与货流分配协同优化研究

韩 宏,魏玉光,刘栩瑞,夏 阳
(北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘 要:为解决公路与铁路在货运领域的竞争加剧,铁路货源流失现象日益严峻的问题,对域外仓选址与货流分配协同优化问题进行研究.首先,分析并指出在既有的港口物流组织模式下,具有“散、小、弱”特征的民营企业在铁路整列发运方面存在意愿不足、能力有限的问题;其次,通过对比既有模式下港口货物运输径路与基于域外仓模式的港口货物运输径路,分析基于域外仓的港口物流组织模式,对于需求规模较小、资金实力有限的中小企业在减少其库存压力与运输成本方面优势;再次,聚焦域外仓选址与货流分配协同优化问题,构建基于服务网络的混合整数规划模型,综合考虑运输成本、建设成本等关键因素,以优化域外仓布局,提高公铁联运效率;最后,以天津港有色矿疏港过程为案例进行实证研究,验证该模型的有效性.研究结果表明:基于域外仓的港口物流组织模式相较于既有模式,可以较大程度地降低总运输成本,提升铁路周转量;在单域外仓模式下,总运营成本降低16.63%,铁路周转量占比45.18%;在多域外仓模式下,总运营成本降低30.81%,铁路周转量占比95.41%.

关键词:公转铁;选址问题;服务网络;域外仓
中图分类号:U297 **文献标志码**:A

Research on the coordinated optimization of off-site warehouse location selection and freight flow allocation for “Road-to-Rail” conversion

HAN Hong, WEI Yuguang, LIU Xurui, XIA Yang
(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the intensifying competition between road and rail freight transportation and the increasingly severe loss of rail freight volume, this study investigates the coordinated optimization of off-site warehouse location selection and freight flow allocation. First, it identifies that under existing port logistics models, private enterprises, characterized by fragmented, small-scale, and weak operations, lack the incentive and capacity for rail block train shipments. Second, by comparing traditional port transportation routes with those integrated with off-site warehouses, this study highlights how the off-site warehouse model alleviates inventory pressure and reduces costs for small and medium-sized

收稿日期:2025-02-28;**修回日期**:2025-08-12
基金项目:国家自然科学基金(52202379);前沿中心基本科研业务费(2022JBQY006);中国铁路北京局集团有限公司科技研究开发计划(2024AH02)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52202379); Basic Scientific Research Operation Expenses of Frontier Center (2022JBQY006); China Railway Beijing Group Co., Ltd. Science and Technology Research and Development Program Project (2024AH02)
第一作者:韩宏(1984—),男,山西朔州人,博士生.研究方向为交通运输规划与管理.**email**:21114096@bjtu.edu.cn.
通信作者:夏阳(1992—),男,安徽铜陵人,讲师,博士.**email**:yangxia@bjtu.edu.cn.

引用格式:韩宏,魏玉光,刘栩瑞,等.面向“公转铁”的域外仓选址与货流分配协同优化研究[J].北京交通大学学报,2026,50(1):208-216.
HAN Hong, WEI Yuguang, LIU Xurui, et al. Research on the coordinated optimization of off-site warehouse location selection and freight flow allocation for “Road-to-Rail” conversion[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 208-216. (in Chinese)

enterprises with limited demand and financial resources. Third, focusing on the coordinated optimization of off-site warehouse location and freight flow allocation, mixed-integer programming model based on service networks is developed. This model comprehensively considers key factors, such as transportation and construction costs, to optimize off-site warehouse layout and enhance road-rail intermodal efficiency. Finally, an empirical study using the port clearance process of non-ferrous ores at Tianjin Port as a case study validates the model's effectiveness. Research findings indicate that the off-site warehouse model significantly reduces total transportation costs and increases rail turnover compared to traditional models. Specifically, the single-warehouse configuration reduces total operating costs by 16.63% with a 45.18% rail turnover share, while the multi-warehouse configuration reduces costs by 30.81% and increases the rail turnover share to 95.41%.

Keywords: road-to-rail conversion; location selection problem; service network; off-site warehouse

随着我国物流行业面临日益严峻的成本压力,优化运输结构、提升物流效率已成为国家物流行业发展的核心目标.在此背景下,“公转铁”作为调整交通运输结构的重要国家战略,正逐步成为物流领域的关注焦点.然而,在传统的港口物流组织模式下,铁路货源大量被公路运输分流,公铁竞争突出,制约了铁路运输市场份额的提升[1].因此,如何通过创新的港口物流组织模式促进公铁协同、增强铁路竞争力,已成为亟待解决的重要问题.当前,在物流组织优化中,港口域外仓的布局优化尤为关键,它直接关系到运输成本、效率及“公转铁”战略的落实效果.目前该模式尚处起步阶段,相关研究匮乏,亟需系统探讨其选址理论与方法,研究重点在于如何在兼顾运输规模与成本的前提下,科学确定域外仓的位置与功能,以支撑“公转铁”背景下港口物流体系的高效运行.

合理布局和科学选址域外仓不仅能缓解铁路与公路运输的竞争关系,促进协同发展,还能加快物流周转,巩固港口在区域物流体系中的核心地位.优化选址有助于提升公铁联运效率,提高铁路运输比例,以更高运能、更低能耗、更少碳排放助力绿色物流发展,减少交通拥堵与环境污染,推动现代港口物流体系的优化升级.因此,域外仓的合理选址是“公转铁”实施过程中关键的科学问题.近年来,选址研究主要集中在枢纽、物流中心和配送中心等设施的优化.对于枢纽选址方面的研究主要是针对运输成本、网络效率及多分配策略等问题进行分析与优化:文献[2]考虑运输成本、枢纽建设成本和运营成本的利润最大化枢纽选址问题,提出了单分配、多分配及r-分配的枢纽选址模型.文献[3]关注运河对班轮枢纽选址的影响,建立了包含运河收费、拥堵状况及船舶容量限制的P-中位枢纽选址模型,研究表明船舶通行能力限制对枢纽选址的影响最为显著.文献[4]研究了轮辐式班轮运输网络设计,解决了拥堵条件下的有限容量枢纽港选址及货物路径优化问题,以降低总运输成本.文献[5]针对长江经济带的航运特点,构建考虑作业时间的双目标枢纽选址模型,以优化干线集装箱运输.对于物流中心和配送中心选址方面的研究主要是针对应急物流、铁路物流等背景下的成本最小化与服务覆盖优化问题:文献[6]采用P-中值模型求解应急物流配送中心选址问题,以减少服务里程、提高单位服务效率.文献[7]利用聚类-重心法进行应急物流选址研究,实验证明该方法可优化一级应急物流配送中心的布局.文献[8]提出改进灰狼优化算法求解铁路物流配送中心选址问题,提升了计算精度和效率.文献[9]基于改进麻雀搜索算法优化物流配送中心选址,降低了配送成本,提高了物流效率.文献[10]采用两段式智能算法求解物流选址及路径规划问题,优化物流企业成本结构,提升经济效益.文献[11]针对高铁快运业务的辐射范围、需求潜力及经济收益等因素,建立基于总成本最小化的覆盖范围限制选址模型.文献[12]设计了高铁快运基地载体城市布局评价体系,并构建基于最大覆盖理论的网络布局模型.文献[13]提出基于服务网络优化方法的高铁快运基地选址及规模优化模型,以提升快运网络的整体效率.文献[14]结合停车设施分布和安全间距要求构建优化模型.文献[15]建立动车所选址与列车开行方案的协同优化模型,并设计拉格朗日松弛算法进行求解.此外,多准则决策方法和层次分析法也在选址问题中得到广泛应用:文献[16]探讨了多因素选址优化问题.文献[17]基于模糊层次分析法,构建了一种新型的选址决策模型.文献[18]提出了综合决策框架,以提升特定设施选址的韧性与可持续性.

既有研究虽在枢纽、物流中心及应急物流选址方面取得了一定进展,但对域外仓选址问题尚无深

入研究.域外仓作为一种新型的物流节点,其核心价值在于能够通过优化物流组织流程,有效整合分散需求、降低中小企业库存与运输成本,从而增强铁路运输竞争力.因此,本文结合域外仓的上述特点与优势,对其选址问题展开研究:首先,以域外仓为研究对象,聚焦于"公转铁"背景下的新型多式联运节点;然后,从定性角度对比分析域外仓模式相较于传统模式,在帮助中小企业缓解库存压力、降低运输成本方面的优势;最后,构建基于服务网络的混合整数规划模型,综合考虑运输成本、建设成本等关键因素,以优化域外仓布局,提高公铁联运效率.

1 问题描述

1.1 港口域外仓

港口域外仓是指在内陆地区建立的具有货物堆存、报关、报验、签发提单等服务功能的物流中心,在优化供应链结构、提升物流效率方面具有较大优势.港口域外仓与内陆港虽在功能上存在交集,但二者并非完全不同.港口域外仓通常由沿海港口企业主导建设,通过前置仓储、前置贸易和集散为整等方式,重构传统的物流组织模式,将大量具有"散、小、弱"特征的民营企业运输需求集散为整,提升其在铁路整列发运方面意愿与能力,进而推动"公转铁"有效落实,助力降低社会物流成本.而内陆港则通常由地方政府或铁路部门主导,通过优化区域内的铁路和公路网络布局,增强内陆地区与沿海港口之间的物流联通性,是推动区域经济协同发展的重要节点.

港口域外仓的建设对多方均具有显著优势.对港口,其优势体现在推动"公转铁"落地、降低社会物流成本,同时通过前移港口功能,缓解港内堆存压力、减少仓储资源占用.对贸易商,可依托政府补贴与较低租金降低运营成本,且货物贴近目标市场的布局,能助力拓展销售渠道、提升客户响应速度.对货主,支持就近采购以增强供应链灵活性与响应能力,同时借助铁路运输的成本优势,有效降低物流开支、提升资金周转效率、减少货款占压,实现整体经营运作的高效化.

布局港口域外仓需满足多项关键条件:应选址于货源集中地,周边辐射规模性企业,保证货源集中且需求稳定;需具备铁路设施设备,优先利用现有物流园区、铁路专用线或货场,确保场地硬化、库区齐全并具有一定仓储规模;需兼具金融与监管属性,既能提供货物堆存和交易条件,又能为工厂客户提供资金服务、为贸易商提供仓储监管服务;应与具备稳定供应链合作关系的大型贸易商合作,以规避"货到地头死"风险;布局需符合市场经济规律,通过堆场前移、异地通关、金融服务和规模化运输等方式有效降低物流成本,确保总体费用不高于现行成本,凸显域外仓的经济性优势.

1.2 基于域外仓的港口物流组织模式

港口物流组织模式主要包括铁海联运、公海联运及公铁海联运,铁路入港已成为集疏运发展的主流方向.铁海联运适用于大宗、长距离运输,具有成本低、环保性强的优势;公海联运灵活快捷,适合短途、小批量货物运输,但运输成本高、碳排放大;公铁海联运融合3种运输方式,适用于中等运距、多节点集散,兼顾运输效率与服务覆盖范围.

在既有的港口物流组织模式下,以港口疏港过程为例,货物由水路运输至港口后,主要依赖铁路与公路两种方式完成疏港运输.然而,许多货物主要运往区域内中小型加工企业,由于这些企业规模较小、布局分散且资金实力有限,难以采用铁路整列运输模式,导致在既有模式下,港口地区铁路物流的市场竞争力相对较低.在基于域外仓的港口物流组织模式下,通过在内陆地区设置域外仓,对货物进行前置储存,从而改变了传统的疏港组织方式,构建起铁水联运与公铁联运相结合的新型运输体系.港口作为供应端,先将货物运输至域外仓,随后由域外仓根据市场需求分拨至下游加工企业,实现高效的资源流通与精准配送.在此模式下,不同规模的企业可采用相应的物流方案:对于需求规模较小、资金实力有限的中小企业,域外仓提供灵活高效的物流支持,减少其库存压力与运输成本;对于需求量较大的企业,则可直接采用铁路整列运输模式,从港口直达目的地,避免额外的中转环节,提高物流效率.基于域外仓模式的运输径路变化示意图如图1所示.

域外仓模式货物物流过程如图2所示,可划分为两个主要阶段:阶段1,货物由港口通过铁路运输至域外仓,实现前置储存,优化供应链前端布局;阶段2,域外仓根据企业需求,通过公路提供"门到门"运输服务,确保货物快速精准送达,提高供应链响应能力与整体运行效率.

1.3 域外仓选址与货流分配协同优化

域外仓选址问题指的是在多个货源分布较为零散但需求相对集中的地区,基于现有的物流园区、铁路专用线及货场等完善基础设施,结合货物需求结构,科学合理地确定域外仓的数量与布局方案.首

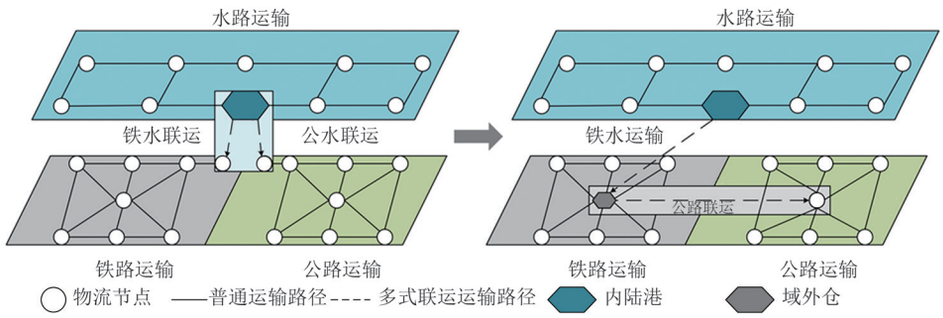


图 1　基于域外仓模式的运输径路变化示意图

Fig.1　Schematic diagram of transport route evolution based on the off-site warehouse model

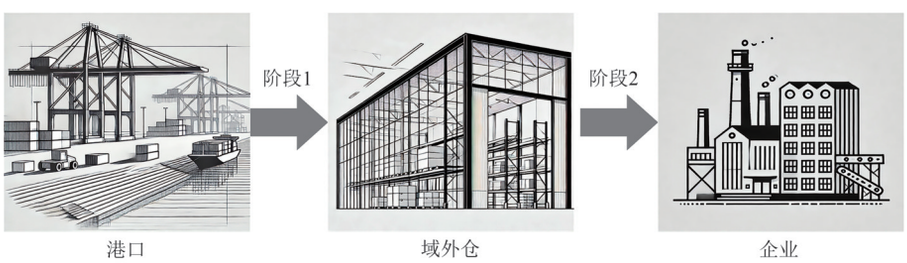


图 2　域外仓模式货物物流过程

Fig.2　Cargo logistics process under the off-site warehouse model

先,通过分析货物需求结构,确定域外仓选址的备选集.然后,结合域外仓的港口物流组织模式,将货物的运输物理网络转化为服务网络,从而将域外仓选址问题转化为基于服务网络的货物流量分配问题,有效简化研究问题的复杂度.

为阐明基于服务网络的域外仓选址方法,通过对比不同域外仓数量条件下的港口物流组织模式,展示其运输结构变化与组织效益.基于服务网络的域外仓选址问题示意图,如图 3 所示.图 3 中:①S1 与 S2 分别表示港口的两个物流节点,A 与 B 代表两个货源分布较为零散但需求相对集中的且具备域外仓选址条件的区域,A′ 与 B′ 分别对应在区域 A 或区域 B 设立域外仓.②在无域外仓条件下的港口物流组织物理网络中,由于 A 与 B 两个区域内货源分布较为零散,大多数企业不会选择铁路运输方式,而是会选择公路运输方式.因此,在无域外仓的条件下,港口物流组织服务网络大多是以公路运输方式为主.③通过对比单一或多域外仓条件下的服务网络可知,域外仓的数量与布局对港口物流组织有着较大的影响.域外仓数量越少,铁路运输方式在港口物流组织过程中参与程度越低,公路运输方式在港口物流组织过程中参与程度越高,反之,域外仓数量越多,铁路运输方式在港口物流组织过程中参与程度越高,公路运输方式在港口物流组织过程中参与程度越低.然而,域外仓的建设与管理需要一定成本,因此,其数量并非越多越好.为了在成本与效益之间找到最佳平衡点,需要借助数学优化模型进行综合考量与权衡.

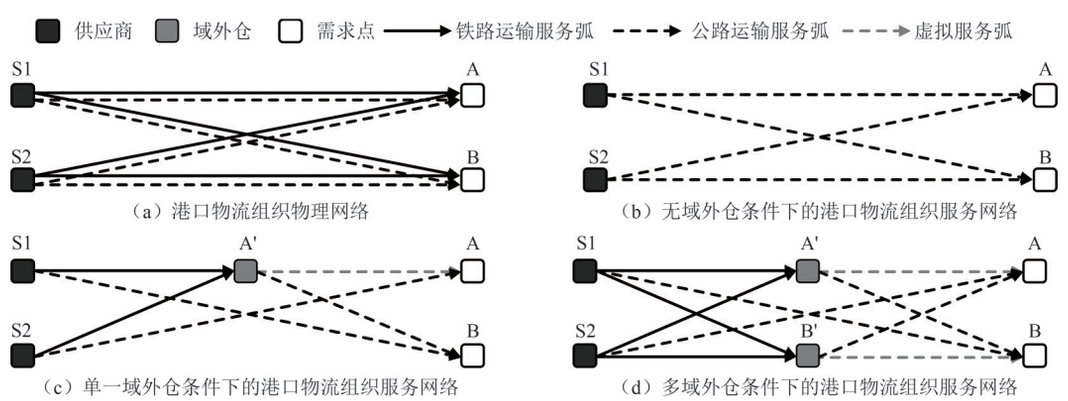


图 3　基于服务网络的域外仓选址问题示意图

Fig.3　Schematic diagram of the off-site warehouse location selection problem based on the service network

2 模型构建

2.1 问题假设

为方便建立模型，现假设：港口货物供应能力及各区域的市场需求量已知；集港过程与疏港过程可用同样的方法处理，模型以港口疏港方向为研究对象；域外仓可以服务于所选区域内的各个企业；模型以在铁路整列发运方面意愿不足、能力有限的“散、小、弱”企业运输需求作为研究对象，通过域外仓模式集散为整，运输途中使用集装箱整列发运的方式.

2.2 集合、参数和变量说明

模型参数与决策变量的设置及具体含义如表1所示.

表1 集合、参数及变量定义

Tab.1 Definition of sets, parameters, and variables

符号	含义	符号	含义
S	港口货物供应点集合，$s\in S$	c_{transfer}	货物倒装成本
W	域外仓集合，$w\in W$	f_w	选择在w处建立域外仓的固定成本
P	需求点集合，$p\in P$	Cap_s	供应商s的供应能力
N	服务网络中的点集合，$N=S\cup W\cup P$，$n\in N$	d_p	客户p处的货物需求量
A	服务网络中的弧集合，$a\in A$	Cap_w	域外仓w的最大容量
A'_{road}	直接由港口运输至企业的公路运输服务弧集合	M	新建的域外仓最大数量
A''_{road}	由域外仓运输至企业的公路服务弧集合	c_a	弧a的运费
A_{road}	公路运输服务弧集合，$A_{\text{road}}=A'_{\text{road}}\cup A''_{\text{road}}$	x_a	弧a上分配到的货物运输量
$A^-(n)$，$A^+(n)$	在n的入弧集合与出弧集合	y_w	0-1决策变量，如果选择在w处建立域外仓，则$y_w=1$，否则$y_w=0$

2.3 目标函数

模型以最小化供应商通过港口域外仓向各需求点运输货物的总运输成本为目标，其中，总运输成本主要由铁路与公路运输成本、货物倒装作业成本及港口域外仓的建设成本构成.总运输成本具体表示为

$$\min z=\sum_{a\in A}x_a c_a+\sum_{a\in A''_{\text{road}}}x_a c_{\text{transfer}}+\sum_{w\in W}f_w y_w \quad (1)$$

2.4 约束条件

结合服务网络模型的特点，建立约束条件为

$$\sum_{a\in A^+(s)}x_a\leqslant \text{Cap}_s \quad \forall s\in S \quad (2)$$

$$\sum_{a\in A^-(w)}x_a=\sum_{a\in A^+(w)}x_a \quad \forall w\in W \quad (3)$$

$$\sum_{a\in A^-(p)}x_a\geqslant d_p \quad \forall p\in P \quad (4)$$

$$\sum_{a\in A^-(w)}x_a\leqslant \text{Cap}_w y_w \quad \forall w\in W \quad (5)$$

$$\sum_{w\in W}y_w\leqslant M \quad (6)$$

$$x_a\geqslant 0 \quad \forall a\in A \quad (7)$$

$$y_w\in\{0,1\} \quad \forall w\in W \quad (8)$$

式(2)表示供应商向港口域外仓提供的货运量受到其自身供应能力的约束，即供应商在满足自身产能限制的前提下，向域外仓输送货物，确保了港口物流运输组织的合理性，防止供应超出可承受范围；式(3)表示流入与流出域外仓的货物流量供需平衡，用于确保港口域外仓所接收的货物能够被充分分配至各个需求点，避免货物积压或分配不均的问题，保证供应链的稳定性，使得所有需求点都能及时获得所需货物，从而提升物流系统的整体效率和服务水平；式(4)表示各个地区的企业需求都应该得到满足，即港口域外仓在货物流转过程中，需保证所有需求点均能获得足够的供应，以维持其正常生产和运营，防止因供货不足导致生产中断或物流瓶颈，从而影响供应链的稳定性；式(5)表示域外仓内堆存的货物数量必须受到其容量限制的约束，即仓库的实际存储量不能超过其设计承载能力，确保了仓储资源的合理利用，防止因超载存放导致管理混乱、操作困难或安全隐患；式(6)表示新建的域外仓数量必须受到最大允许建造数量的限制，即在规划和建设过程中，新增仓库的总数不能超过预设的上限，确保物流网络的合理布局，避免因仓库数量过多导致资源浪费、管理成本上升或土地利用不合理；式(7)至式(8)为决策变量的取值范围，防止不合理解的出现.

3 案例验证

本文通过Python编程语言进行实验，并在配置为Intel Core i5-8265U CPU@1.60GHz的计算机环境下运行.以天津港疏港为研究案例，针对其疏港运输过程中具备“公转铁”潜力的有色矿产品类货物，在域外仓模式下，运用选址优化模型展开深入分析，从而验证所构建模型的有效性.

3.1 数据准备

根据中国铁路北京局集团有限公司货运物流服务中心2022年的调研数据，天津港有色矿日均进口

量为87 945 t,其中北疆港区日均进口54 082 t,南疆港区日均进口33 863 t.这些有色矿主要输送至内蒙古自治区、宁夏回族自治区、甘肃省、青海省和山西省等西北、华中区域.

内蒙古自治区日均需求45 205 t,其中乌兰察布市需求35 616 t,公路运输占比97%;包头市需求9 589 t,公路运输占比70%.宁夏回族自治区日均需求24 658 t,其中石嘴山市需求20 548 t,公路运输占比89%;中卫市需求4 110 t,公路运输占比73%.山西省日均需求7 671 t,公路运输占比96%.甘肃省日均需求1 644 t,全部为公路运输.青海省日均需求2 466 t,也全部依赖公路运输.

天津港至各地区的铁路运距数据来源于中国铁路北京局集团有限公司相关公开资料,如表2所示.

表2　天津港至各地区的铁路运距

Tab.2　Railway transport distance from Tianjin Port to various regions

地区	天津港铁路主要疏港站点	铁路平均运距/km
内蒙古自治区	乌兰察布市	624
	包头市	999.5
宁夏回族自治区	石嘴山市	1 133
	中卫市	1 376
山西省	太原市	626
甘肃省	兰州市	1 682
青海省	西宁市	1 898

各项参数的设定参考中国铁路北京局集团有限公司货运物流服务中心的调研数据及相关公开资料整理得出,优化模型中相关参数设定如表3所示.表3中,运费的取值是在综合考虑运输费用、仓储费用、货运杂费等基础上设置的.

表3　优化模型中相关参数设定

Tab.3　Parameter settings for the optimization model

参数	取值	参数	取值
铁路运费/(元/(t·km))	0.5	建立域外仓的固定成本f_w/万元	20
公路运费/(元/(t·km))	0.6	域外仓最大容量Cap_w/t	200 000
倒装作业费用c_{transfer}/(元/t)	20	—	—

3.2　结果分析

为验证基于域外仓的港口物流组织模式的优势,设置与既有港口物流组织模式的对比实验.在既有港口物流组织模式下,设置新建的域外仓最大数量$M=0$,除该参数外,其他参数与基于域外仓的港口物流组织模式实验参数设置保持一致.对比实验求解结果如表4所示.由表4可知:基于域外仓的港口物流组织模式相较于既有模式,可以一定程度上降低总运输成本(目标函数值),提升铁路周转量;在单域外仓模式下,总运营成本降低16.63%(既有模式1 835.13万元,单域外仓模式1 529.98万元),铁路周转量占比45.18%;在多域外仓模式下,总运营成本降低30.81%(既有模式1 835.13万元,多域外仓模式1 269.76万元),铁路周转量占比95.41%.表4中展示的铁路周转量仅针对零散企业需求,0%代表原先这部分需求是通过公路运输,而45.18%与95.41%是代表有域外仓之后通过铁路运输的需求量,从而证明了域外仓对于提升港口铁路零散货物需求周转量的有效性.

表4　对比实验求解结果

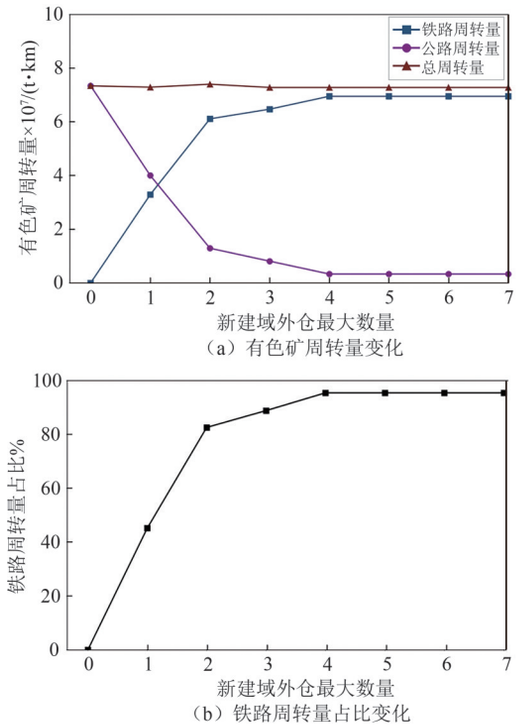
Tab.4　Computational results of comparative experiments

模式	目标函数值/万元	铁路周转量×10^7/(t·km)	铁路周转量占比/%
既有模式($M=0$)	1 835.13	0.0	0
单一域外仓模式($M=1$)	1 529.98	3.29	45.18
多域外仓模式(M任意大)	1 269.76	7.04	95.41

对比实验中有色矿周转量及铁路周转量占比的变化曲线如图4所示.由图4可知:①在模型的求解结果中,总周转量受有色矿需求量和运输距离的影响,通过建立域外仓,能够在一定程度上减少有色矿的疏港运输距离.②增加域外仓数量,会使铁路运输方式在港口物流组织过程中参与程度提高.但是域外仓数量并非越多越好,在多域外仓模式下,新建域外仓数量最优为4个.因此,当新建的域外仓最大数量M取到4之后,总运输成本不会再因可以新建的域外仓数量的增加继续减小,该方案即为最优方案.③域外仓的建设有助于提升有色矿的铁路运输周转量,促进铁路融入有色矿产业链体系,增强铁路物流在天津港地区的核心竞争力,从而推动“公转铁”有效实施.

最优方案下的域外仓选址及流量分配情况如图5所示.最优方案下的有色矿流量分配方案如表5所示.

在对比实验的基础上,对模型中其他关键参数进行灵敏度分析.首先对域外仓建设固定成本进行灵敏度分析.不同域外仓建设固定成本条件下最优域外仓数量及铁路周转量占比的变化曲线如图6所示.由图6可知:①随着域外仓建设固定成本不断增



（a）有色矿周转量变化

（b）铁路周转量占比变化

图 4 对比实验中有色矿周转量及铁路周转量占比的变化曲线

Fig.4 Variation curves in non-ferrous ore turnover and rail turnover share in comparative experiments

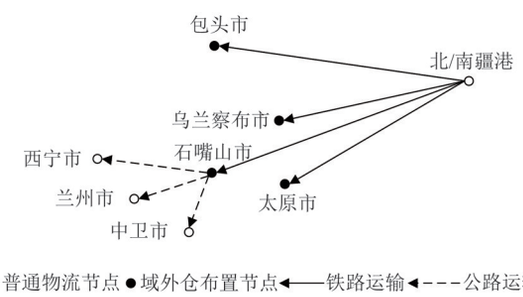
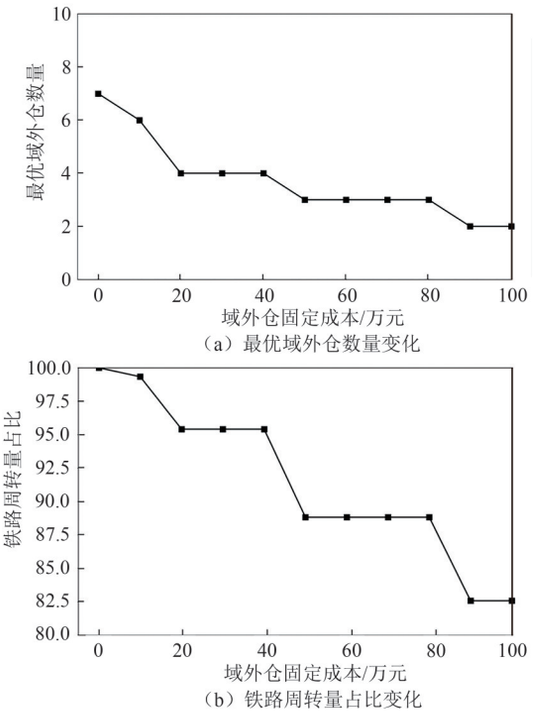


图 5 最优方案下的域外仓选址及流量分配情况

Fig.5 Optimal off-site warehouse locations and flow allocation results

加，最优域外仓数量将下降．然而，该下降趋势并不是完全线性的．如固定成本为 20 万元～40 万元，最优域外仓数量为 4，而固定成本在 50 万元～80 万元，



（a）最优域外仓数量变化

（b）铁路周转量占比变化

图 6 不同域外仓建设固定成本条件下最优域外仓数量及铁路周转量占比的变化曲线

Fig.6 Optimal number of off-site warehouses and rail turnover share relative to variations in fixed construction costs

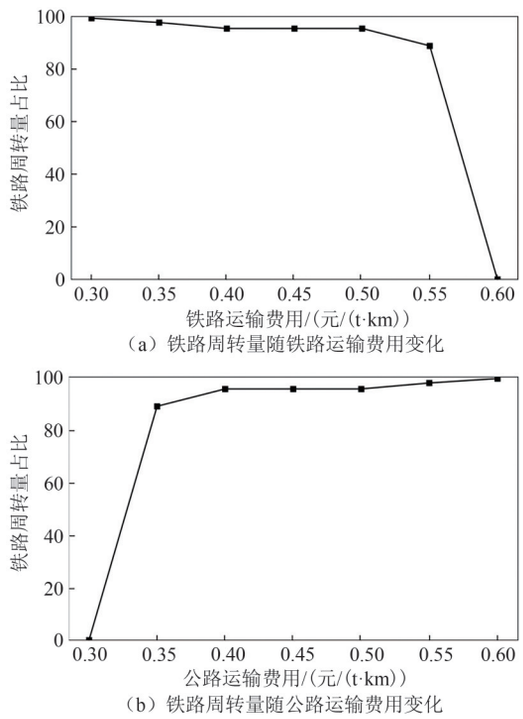
最优域外仓数量为 3.②铁路周转量占比变化趋势与最优域外仓数量变化趋势相似，均会由于固定成本的增加而下降．

对铁路与公路运输费用进行灵敏度分析．不同铁路与公路运输费用条件铁路周转量占比的变化曲线如图 7 所示．由图 7 可知：随着铁路运输费用的不断增加，铁路周转量占比将下降，当铁路运输费用与公路运输费用相同时，模型中的货流均被分配至直接由港口运输至企业的公路运输服务弧，且最优域外仓数量为 0，此时铁路运输在与公路运输竞争的过程中将失去优势．根据铁路周转量随公路运输费用变化曲线，也可以得到相同的结论．

表 5 最优方案下的有色矿流量分配方案

Tab.5 Optimal non-ferrous ore flow allocation under the optimized scheme

始发地	目的地	运输量/t
天津港北疆港区	内蒙古自治区乌兰察布市	11 342
	宁夏回族自治区平罗县	29 068
	山西省太原市	7 671
天津港南疆港区	内蒙古自治区乌兰察布市	24 274
	内蒙古自治区包头市	9 589
宁夏回族自治区石嘴山市	宁夏回族自治区中卫市	4 410
	甘肃省兰州市	1 644
	青海省西宁市	2 466



（a）铁路周转量随铁路运输费用变化

（b）铁路周转量随公路运输费用变化

图 7　不同铁路与公路运输费用条件铁路周转量占比的变化曲线

Fig.7　Variation curves of railway turnover ratio under different railway and highway transportation cost conditions

4　结论

1）相较于既有模式,基于域外仓的港口物流组织模式可以一定程度上降低总运输成本,提升铁路周转量.在单域外仓模式下,总运营成本降低16.63%,铁路周转量占比45.18%;在多域外仓模式下,总运营成本降低30.81%,铁路周转量占比95.41%.

2）随着域外仓建设固定成本的增加,铁路周转量占比将会下降,建议选择既有场站,以降低域外仓建设固定成本,为贸易商入驻提供基础条件.此外,随着铁路运输费用的不断增加,铁路周转量占比将下降,建议国家或政府给予域外仓一定的价格补贴政策,促进“公转铁”落地实施.

模型主要从宏观层面分析了运输成本与建设成本,未考虑货流分配的动态变化及其对域外仓选址与货流调整的影响.未来研究将进一步考虑作业环节时效性因素,构建具备动态响应能力的港口域外仓选址与货流分配模型,以提升方案的实际适用性与可操作性.

参考文献(References):

[1] 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)

[2] TAHERKHANI G, ALUMUR S A. Profit maximizing hub location problems[J]. Omega, 2019, 86: 1－15.

[3] ZHENG J F, ZHANG W L, QI J W, et al. Canal effects on a liner hub location problem [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 130: 230－247.

[4] ZHENG J F, YANG L X, NI L N, et al. Efficient models for the liner shipping hub location problem with spatial structure[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173: 108725.

[5] 王小强.长江经济带内河集装箱枢纽港选址研究[D].大连:大连海事大学,2020.
WANG Xiaoqiang. Study on the location of inland container Hub Port in the Yangtze River Economic Belt [D]. Dalian :Dalian Maritime University, 2020.(in Chinese)

[6] 滕红军,舒志乐,张鑫,等.地震灾害应急物流配送系统模型优化方法研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(4):160－167.
TENG Hongjun, SHU Zhile, ZHANG Xin, et al. Study on model optimization method of emergency logistics distribution system in earthquake disaster[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(4): 160－167.(in Chinese)

[7] 倪卫红,陈太.基于聚类-重心法的应急物流配送中心选址[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(2):255－263.
NI Weihong, CHEN Tai. Location selection of emergency logistics distribution center based on clustering-center of gravity method[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2021, 43(2): 255－263.(in Chinese)

[8] 郝芃斐,池瑞,屈志坚,等.求解铁路物流配送中心选址问题的改进灰狼优化算法[J].计算机应用,2021,41(10):2905－2911.
HAO Pengfei, CHI Rui, QU Zhijian, et al. Improved grey wolf optimizer for location selection problem of railway logistics distribution center[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(10): 2905－2911.(in Chinese)

[9] 杨小琴,朱玉全.改进麻雀搜索算法求解物流配送中心选址问题[J].计算机工程与设计,2023,44(5):1441－1450.
YANG Xiaoqin, ZHU Yuquan. Improved sparrow search algorithm for solving logistics distribution center location problem [J]. Computer Engineering and Design, 2023,

44(5): 1441－1450. (in Chinese)

[10] 廖建国. 基于布谷鸟算法的物流选址及路径优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(10): 322－328.
LIAO Jianguo. Logistics location and routing optimization based on cuckoo algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(10): 322－328. (in Chinese)

[11] 李国旗, 申皓, 焦敬娟. 依托高速铁路网络的快递转运枢纽选址研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 9－14.
LI Guoqi, SHEN Hao, JIAO Jingjuan. Study on location of express transshipment hubs based on high-speed railway network[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 9－14. (in Chinese)

[12] 周凌云, 丁小东, 王涵晴, 等. 基于最大覆盖理论的高铁快运网络布局方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 54－59.
ZHOU Lingyun, DING Xiaodong, WANG Hanqing, et al. Research on layout method of high speed railway express networks based on maximum coverage theory[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 54－59. (in Chinese)

[13] 马春山, 廖正文. 基于服务网络的高铁快运基地选址及规模优化方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 463－472.
MA Chunshan, LIAO Zhengwen. An optimization method of high-speed rail express base location selection and scale based on service network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 463－472. (in Chinese)

[14] 王志成, 徐金辰, 常燕燕, 等. 基于静态充电需求的城市公共充电桩选址决策模型[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 48－54.
WANG Zhicheng, XU Jinchen, CHANG Yanyan, et al. Location selection model for urban public charging stations based on static charging demands[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 48－54. (in Chinese)

[15] 崔赞扬, 张星臣, 王志美, 等. 动车所选址和列车开行方案编制协同优化[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(4): 89－94.
CUI Zanyang, ZHANG Xingchen, WANG Zhimei, et al. Coordinated optimization of EMU depot location and line planning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(4): 89－94. (in Chinese)

[16] KANG Y O, YABAR H, MIZUNOYA T, et al. Optimal landfill site selection using ArcGIS Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and Analytic Hierarchy Process (AHP) for Kinshasa city[J]. Environmental Challenges, 2024, 14: 100826.

[17] KAHRAMAN C. Proportional picture fuzzy sets and their AHP extension: Application to waste disposal site selection[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122354.

[18] FENG J H, GUO P, XU G Y, et al. An integrated decision framework for resilient sustainable waste electric vehicle battery recycling transfer station site selection[J]. Applied Energy, 2024, 373: 123897.