



内河港口腹地多式联运枢纽选址研究*

王为汉, 唐国磊, 吴青谊, 杨 芊, 金海淳, 王一鸣

(大连理工大学, 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对“双碳”战略下内河港口腹地多式联运枢纽选址问题, 提出以最小化整个规划期内企业运输成本(包括货物运输成本、中转成本和碳排放成本)和枢纽运营成本(包括固定运营成本和改扩建成本)为目标的数学模型。根据数学模型的特征, 设计了“初选-优选-优化”的求解方法, 并应用于某内河沿线港口腹地多式联运枢纽选址。该方法首先基于各阶段货运需求, 应用重心法选址模型确定给定枢纽数量对应的备选枢纽范围; 其次, 基于站点规模、发展空间与服务能力等指标, 利用 AHP-TOPSIS 法(层次分析法-优劣解距离法)从备选枢纽中优选各阶段各枢纽点数量对应的枢纽集合; 最后, 采用多式联运枢纽选址优化模型, 确定不同决策偏好下的枢纽选址方案。结果表明, “初选-优选-优化”求解方法便捷可靠, 为内河航道腹地多式联运枢纽规划提供了系统化方法工具。

关键词: 内河港口; 多式联运; 枢纽选址; 集疏运规划

中图分类号: U651+.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0060-09

Site selection of multimodal transport hub in hinterland of inland port

WANG Weihang, TANG Guolei, WU Qingyi, YANG Qian, JIN Haibo, WANG Yiming

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 110624, China)

Abstract: Aiming at the practical problems of intermodal transport network planning in the hinterland of inland ports under the “dual-carbon” strategy, a mathematical model of intermodal transport hub location in the hinterland of inland river ports is proposed and a solution method is designed. The mathematical model is constructed with the objective of minimizing the enterprise transportation cost (including cargo transportation cost, transit cost and carbon emission cost) and hub operation cost (including fixed operation cost and renovation/expansion cost) during the planning period, and the solution method is designed based on the idea of “preliminary selection-preferred selection-optimization”. The method firstly determines the list of alternative hubs based on the results of gravity method; secondly, based on the indicators of site size, development space and service capacity, the AHP-TOPSIS method is used to select the hubs corresponding to the number of hubs at each stage and the number of hubs from the alternative hubs, and obtains the set of preferred hubs; lastly, the multimodal hub location mathematical model is used to obtain the final hub siting scheme. Taking a port group along an inland river as an example, the hub location under different decision preferences is determined. The results show that the proposed model and algorithm are convenient and reliable, and provide a systematic methodological tool for multimodal hub planning in the hinterland of inland waterways, which can help reduce logistics costs and promote the transformation of low-carbon logistics.

Keywords: inland port; multimodal transport; hub site selection; collection and distribution planning

收稿日期: 2025-03-25 录用日期: 2025-05-07

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0201200)

作者简介: 王为汉(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水运规划与港口仿真优化研究。

通信作者: 唐国磊(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港口大数据和智能港口决策支持研究。

E-mail: 1106270236@mail.dlut.edu.cn

内河港口在我国综合交通运输体系中占据着重要地位。目前, 沿江沿河地区为抢抓发展机遇, 纷纷规划建设港区, 借助港口资源带动腹地开发和经济发展^[1], 而腹地多式联运网络的运输效率则直接影响内河港口带动腹地经济发展的能力^[2]。其中, 多式联运枢纽在多式联运中发挥着至关重要的作用, 它们是不同的运输方式(如公路、铁路、水路等)之间的连接点, 确保货物能够在不同运输方式之间高效流转。因此, 内河港口腹地多式联运枢纽研究对于优化区域多式联运网络、提升港口对腹地经济的辐射带动能力具有重要意义, 可为沿江沿河地区经济可持续发展提供有力支撑。

多式联运枢纽选址多以考虑网络总成本、顾客满意度、碳排放等指标为主, 研究城市间多式联运枢纽选址问题^[3]。例如, 申皓等^[4]以包括 24 个中心城市节点的空铁联运网络为对象, 通过各节点城市中心性评价结果, 确定联运枢纽选址; 孙祎峥等^[5]针对非洲西海岸 28 个代表性港口, 以最小化运输总成本为目标确定集装箱枢纽港选址; Leng 等^[6]针对 18 个节点、32 条边组成的多式联运网络, 研究了同时考虑取送货和硬时间窗的选址问题; Shi 等^[7]采用 TOPSIS 法(优劣解距离法)对西非国家经济共同体多式联运网络中 27 个节点的中心性进行排序建模, 确定转运中心。针对港口腹地的枢纽选址问题相关研究较少, 张祺^[8]针对大连港和营口港竞争东三省腹地多式联运份额的问题, 引入博弈论概念, 构建了网络布局博弈模型, 以确定博弈均衡下港口集疏运枢纽选址; 蔡

越^[9]选取港口腹地联运网络运营效率评价指标, 评价重庆港腹地网络中主要运输通道和枢纽的重要性。

总体上, 现有研究更多聚焦于城市间多式联运货运枢纽选址研究, 节点规模大且分布范围广; 大多基于需求不变的静态假设; 统筹考虑综合运输成本和中转节点特征的研究较少。然而, 内河港口腹地多式联运枢纽选址具备如下特征: 1) 内河沿线港口作业区分布规模小且分布密集, 腹地中货运站和企业众多, 路网结构复杂; 2) 伴随航道扩能升级, 腹地企业货运需求不断演化; 3) 在降低综合运输成本的基础上, 利用现有存量设施降低枢纽运营成本。为此, 本文提出一种内河港口腹地多式联运枢纽选址优化模型, 并设计简便可靠的求解方法, 旨在为枢纽规划提供支撑。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

某内河沿线规划了 5 个港口, 共 14 个作业区, 其腹地范围内包含 45 个铁路货运站和 282 家企业, 见图 1。以服务企业原材料的进口大宗散货运输为主, 货物从沿海港口换装成内河船出发, 通过内河航道与腹地的铁路、公路以及港口作业区集疏运通道等运输路径, 构成多式联运货物运输网络。因此, 货物流向主要分为两种联运方式: 1) 水-铁-公路径。经水运至沿线港口作业区, 再通过铁路转运至货运站, 最终经公路配送至企业。2) 水-公直达路径。货物从内河沿线作业区上岸后, 直接经公路运输至企业。

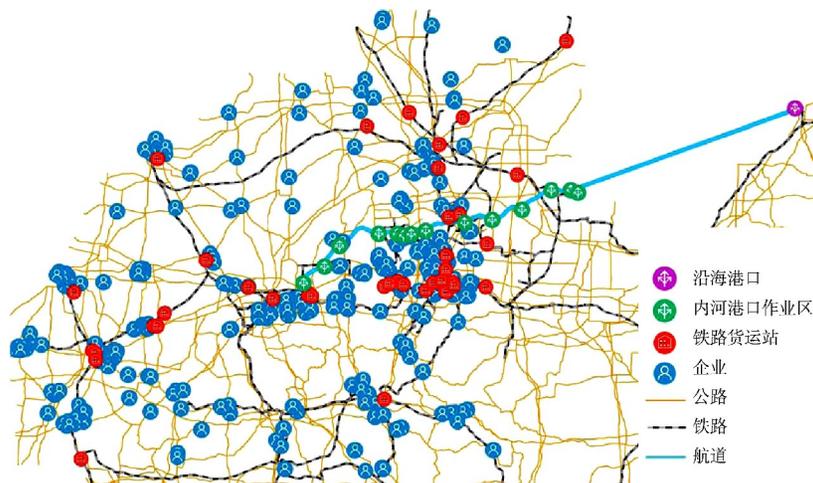


图 1 多式联运网络

Fig. 1 Multimodal transport network

多式联运枢纽在多式联运中发挥着至关重要的作用，它们是不同的运输方式之间的连接点，确保货物能够在不同运输方式之间高效流转。针对内河港口腹地的多式联运枢纽选址问题还包括如下特征：1) 在“双碳”背景下，为高效发挥内河港口对腹地经济的带动作用，应综合考虑经济、效率和环境多个目标，降低企业运输和枢纽运营的协同运营费用；2) 伴随内河航道扩能升级，腹地企业货运需求随时空不断演化，应考虑规划期内不同阶段的需求背景；3) 要利用好现有港口作业区、铁路货运站等存量设施，降低成本。

1.2 优化模型

1.2.1 基本假设

根据以下基本假设建立优化模型^[10]：1) 将规划期按照 5 a 划分为多个阶段。2) 各阶段内各企业货运需求和腹地路网信息已知。3) 一个企业仅由一个枢纽提供货运服务(该假设旨在简化模型复杂度，聚焦枢纽服务范围与路径分配的协同优化问题，实际运营中企业可能由多个枢纽协同服务，后续研究可进一步探讨多枢纽服务模式)。4) 内河港口作业区及配套集疏运铁路已建成(假设现有设施满足基本运营需求，模型中暂不考虑新建作业区或铁路的成本，重点分析枢纽选址与既有设施的协同优化。实际规划中需结合改扩建可行性综合评估)。5) 枢纽改扩建成本和运营成本与其货运能力呈正比。

1.2.2 目标函数及约束条件

以最小化企业运输成本(包括货物运输成本、中转成本和碳排放成本)和枢纽运营成本(包括固定运营成本和改扩建成本)为目标，建立内河港口

腹地多式联运枢纽选址优化模型，相关参数符号定义见表 1。

表 1 相关参数符号定义
Tab. 1 Definition of relevant parameters

相关参数符号	含义	备注
O	沿海港口作业区 o 的集合	
P	内河港口作业区 p 的集合	
R	铁路货运站 r 的集合	
S	企业 s 的集合	
I	所有节点的集合, 其中 $i, j \in I = O \cup P \cup R \cup S$	
T	规划期内各阶段 t 的集合	
K	运输方式 k 的集合, 包括水运、铁路、公路运输	
c_k	运输方式 k 的运输单价, 元/(t·km)	
e_k	运输方式 k 的碳排放因子, kg/(t·km)	
$c_{i,k,l}$	在节点 i , 运输方式由 k 转换为 l 的单位中转成本, $i \in O \cup S$ 时为 0, 元/t	
$e_{i,k,l}$	在节点 i , 运输方式由 k 转换为 l 的单位中转碳排放, $i \in O \cup S$ 时为 0, kg/t	
c_e	碳税, 元/kg	
$w_{s,t}$	在阶段 t 内从 s 企业需要运输的货物货运量, t	
$d_{ij,k}$	节点 i 到节点 j 通过运输方式 k 运输的距离, m	
$f_{i,t}$	在阶段 t 内节点 i 的固定运营成本, $i \in O \cup S$ 时为 0, 元	
$M_{i,t}$	在阶段 t 内节点 i 的改扩建成本, $i \in O \cup S$ 时为 0, 元	
A_t	在阶段 t 内最大可被选取的枢纽数量	
ω_1	决策者对于企业运输成本的考虑权重	
ω_2	决策者对于枢纽运营成本的考虑权重	
$x_{ij,t}$	在阶段 t 内货物是否由节点 i 运输到节点 j , 0~1 变量	决策变量
$y_{i,t}$	在阶段 t 内节点 i 是否被选中为枢纽, 0~1 变量	变量
$y_{j,t}$	在阶段 t 内节点 i 是否被选中为枢纽, 0~1 变量	变量

$$\text{Minimize } C = \omega_1 (C_{11} + C_{12}) + \omega_2 C_2 \quad (1)$$

其中：

$$C_{11} = \sum_{t \in T} \left(\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} (c_k + c_e e_k) w_{s,t} d_{op,k} x_{op,t} + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} (c_k + c_e e_k) w_{s,t} d_{ps,k} x_{ps,t} + \sum_{p \in P} (c_{p,k,k+1} + c_e e_{p,k,k+1}) w_{s,t} y_{p,t} \right) \quad (2)$$

$$C_{12} = \sum_{t \in T} \left(\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} (c_k + c_e e_k) w_{s,t} d_{op,k} x_{op,t} + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} (c_k + c_e e_k) w_{s,t} d_{pr,k} x_{pr,t} + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} (c_k + c_e e_k) w_{s,t} d_{rs,k} x_{rs,t} \right) + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} (c_{p,k,k+1} + c_e e_{p,k,k+1}) w_{s,t} x_{pr} + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} (c_{j,k,k+1} + c_e e_{j,k,k+1}) w_{s,t} x_{rs} \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} f_{i,t} y_{i,t} + \sum_{i \in I} M_{i,t} y_{i,t} \right) \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} (x_{ps,t} + x_{rs,t}) = 1 \quad \forall t \in T, s \in S \quad (5)$$

$$x_{ij,t} \leq y_{i,t} \quad \forall i, j \in I, t \in T \quad (6)$$

$$x_{ij,t} \leq y_{j,t} \quad \forall i, j \in I, t \in T \quad (7)$$

$$x_{ij,t} \geq (y_{i,t} + y_{j,t}) - 1 \quad \forall i, j \in I, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} y_{i,t} \leq A^t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{ij,t} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I \quad (10)$$

$$y'_i \in \begin{cases} \{0, 1\} & \forall i \in I \setminus (O \cup S) \\ \{0\} & \forall i \in O \cup S \end{cases} \quad (11)$$

式(1)为目标函数,表示在不同的决策偏好下最小化整个规划期内企业运输成本和枢纽运营成本之和;式(2)表示货物通过水-公直达路径的综合运输成本;式(3)表示货物通过水-铁-公路路径的综合运输成本;式(4)表示各枢纽日常运营成本与改扩建成本之和;式(5)为在满足任意阶段企业 s 需求的约束;式(6)~(8)为网络连通性约束,确保整个运输路径中各节点通过路径相连接;式(9)为枢纽选择数量约束;式(10)~(11)为决策变量取值范围。

该优化模型属于多阶段序贯决策问题,同时内河港口腹地多式联运网络中节点多、路网复杂,可行解空间大,求解难度高;存在定性和定量指

标,如枢纽站点的发展空间、服务能力等关键指标难以完全量化融入选址模型。因此,本文采用重心法与 AHP-TOPSIS (层次分析法-优劣解距离法)相结合的策略,通过分阶段筛选与多准则评价,既能降低求解难度,亦可统筹处理定量成本与定性指标,适应不同规划期内的货运需求,确保方案的经济性与可操作性。

2 求解方法

针对上述问题,将重心法、AHP-TOPSIS 评价法等相结合,提出一种“初选-优选-优化”三阶段多式联运枢纽选址方法。枢纽选址流程见图 2。
1) 根据各阶段的货运需求,应用重心法模型,获得给定多式联运货运枢纽数量下对应的重心法求解结果,其半径 20 km 覆盖范围内的枢纽点纳入备选清单,实现枢纽位置初选;2) 构建多准则评价体系,包括备选枢纽的类型规模、发展空间与服务能力等指标,应用 AHP-TOPSIS 优选各覆盖范围内的多式联运枢纽选址;3) 应用内河港口腹地多式联运枢纽选址优化模型,确定各阶段多式联运货运枢纽数量及其对应的货运枢纽,并基于此计算得到企业运输和枢纽运营的总成本。

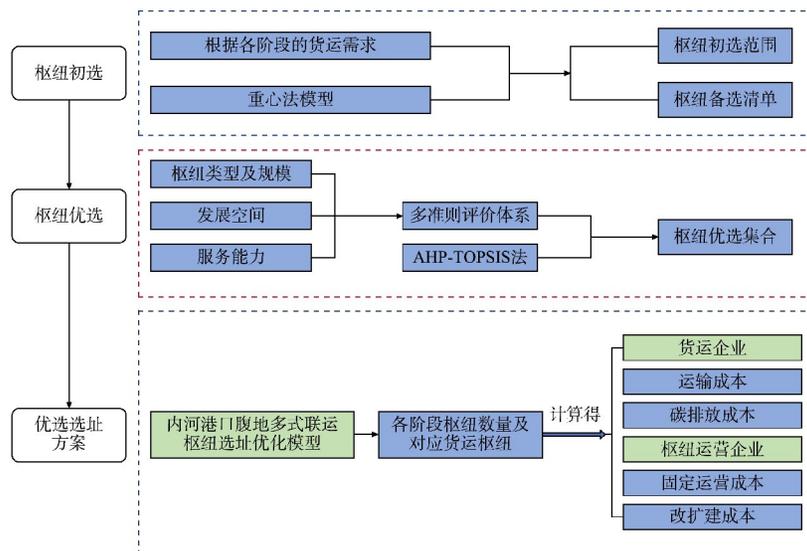


图 2 求解方法流程

Fig. 2 Solution method flow

2.1 基于重心法的货运枢纽初选

应用 anyLogistix 物流系统仿真软件,以货运企业综合运输成本最低为优化目标,建立重心法选址模型,获得重心法求解结果,将其半径 20 km 覆盖范围内的枢纽点纳入备选清单。

在 anyLogistix 仿真模型建模过程中需要设置节点和运输方式等。节点类型及参数:1)沿海港口节点,货物启运地;2)内河港口作业区节点,设定位置与集疏运通道,可被选为枢纽;3)铁路货运站节点,设定位置与铁路连接线,可被选为枢纽;4)企业节点,货物目的地,设定各企业地理位置及运输需求。运输方式包括:1)水-公直达

运输。货物通过内河水运运输到作业区后,直接经公路运输至企业,无需二次中转。2)水-铁-公联运。对于货运量较大或距离港口作业区较远的企业节点,因为铁路运输单价和碳排放量较低,货物从港口作业区卸货后,优先匹配铁路-公路联运路径,降低港口作业区至枢纽段的干线运输成本,实现运输过程的降本增效。

2.2 基于 AHP-TOPSIS 法的货运枢纽优选

2.2.1 层次结构模型及评价指标体系

根据枢纽选址问题特征,参考文献[11],从上而下依次分为目标层、准则层、指标层,构建层次结构模型及初选枢纽的评价指标体系,见表 2。

表 2 初选枢纽的评价指标体系
Tab.2 Evaluation index system for hub selection

目标层	方案层	指标层	描述
枢纽点评价	类型规模 B_1	站点类型 C_{11}	包含内河港口作业区、铁路货运站、物流园区等
		占地面积 C_{12}	备选点占地面积决定了其改扩建规模及最大服务能力
	发展空间 B_2	扩建空间 C_{21}	根据备选点所在位置周围房屋的分布情况确定,房屋密集意味着改扩建时的土地征收拆迁费用的增加
		土地价格 C_{22}	根据备选点所在位置的类型确定,分为城市、城郊、乡村 3 种类型,对应不同的土地征收价格
服务能力 B_3	多式联运衔接水平 C_{31}	货运转卸效率 C_{32}	备选点与附近铁路、高速、国道等货运路径的联通程度
			单位时间内处理货量,反映枢纽作业能力

2.2.2 基于 AHP 的组合权重确定

1) 构造判断矩阵。基于评价指标体系,根据专家意见和 1~9 标度量量化指标间的重要性,形成判断矩阵 $C=(c_{ij})_{n \times n}$ 。

2) 层次单排序。求解判断矩阵 C 的最大特征值 λ_{max} 对应的特征向量 ω_1 , 满足 $C\omega_1 = \lambda_{max}\omega_1$ 。其中 $\omega_1=(\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n})^T$ 即为评价指标体系中各指标的相对权重向量。

3) 一致性检验。求判断矩阵的一致性比率 R_C , $R_C=I_C/I_R$, 其中 I_C 为一致性指标, $I_C=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$; I_R 为平均随机一致性指标,通过查表得到。若 $R_C \leq 0.1$, 则认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵,重新计算直至 $R_C \leq 0.1$ 。

4) 组合权重确定。上层所有因素 $B_1, B_2, \dots,$

B_m 的相对权重分别为 b_1, b_2, \dots, b_m , 且与 B_k 相应的本层次因素 C_1, C_2, \dots, C_m 的权重向量为 $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}(k=1, 2, \dots, m)$, 则组合权重为:

$$W_i = \sum_{k=1}^m b_k w_{ki} (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n) \tag{12}$$

式中: k 和 i 代表上层和本层因素的序号。通过该公式逐层计算,至求解出全部因素的组合权重。

2.2.3 基于 TOPSIS 排序法优选货运枢纽

TOPSIS 法是在多目标决策分析中用于评估和排序方案的一种有效方法。其核心思想是通过比较各方案与理论上的最优解和最劣解的距离来确定最佳方案。计算步骤如下。

1) 计算正理想解和负理想解的值,公式为:

$$p_{ij} = \omega_j r_{A_i, E_j}^c (i=1, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \tag{13}$$

式中: p_{ij} 为第 i 个建设方案相对于第 j 个评价指

标的加权决策值; ω_j 为第 j 个评价指标相对权重。正理想解 $P^+ = \max(P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{nj})$, 负理想解 $P^- = \min(P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{nj})$ 。

2) 计算分离度, 确定备选清单中各现存设施与正理想解的相对接近度 C_i :

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (14)$$

其中:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - P^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - P^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

3) 根据备选清单中可供选择的**多式联运枢纽与正理想解的相对接近度对各方案进行比较, 相对接近度越大表示越接近正理想解, 其重要程度也就越高; 反之则说明其重要程度越低。

综上, 通过重心法和 AHP-TOPSIS 法, 即经过初选和优选后, 可以优选出现存设施中可供选择的**多式联运枢纽布局方案, 可行解空间大大缩小, 再通过优化模型, 确定各阶段多式联运运

枢纽数量及其对应的货运枢纽, 并基于此计算得到企业运输和枢纽运营的总成本。

3 案例分析

某内河沿线港口腹地多式联运网络由企业节点、备选枢纽节点及运输路径组成, 具体信息如下。1) 沿海港口节点: 1 个节点, 作为货物启运地; 2) 内河港口作业区节点: 沿内河航道规划的 5 个港口, 共 14 个作业区; 3) 铁路货运站节点: 腹地范围内现有的铁路场站和物流园区等与铁路联通的节点, 共计 45 个; 4) 企业节点: 根据腹地区域内实际调研得到的 282 个企业信息确定(经纬度、2030 年及 2035 年货运需求等)。

3.1 基于重心法的多式联运枢纽选址

基于 anyLogistix 建立重心法选址模型, 通过设置 2030 年及 2035 年不同枢纽点数量以及企业货运需求, 分别获得 2030 年和 2035 年的 3~7 个枢纽点数量下初选枢纽位置, 见图 3、4, 并取其半径 20 km 范围内的备选枢纽点列入初选方案。

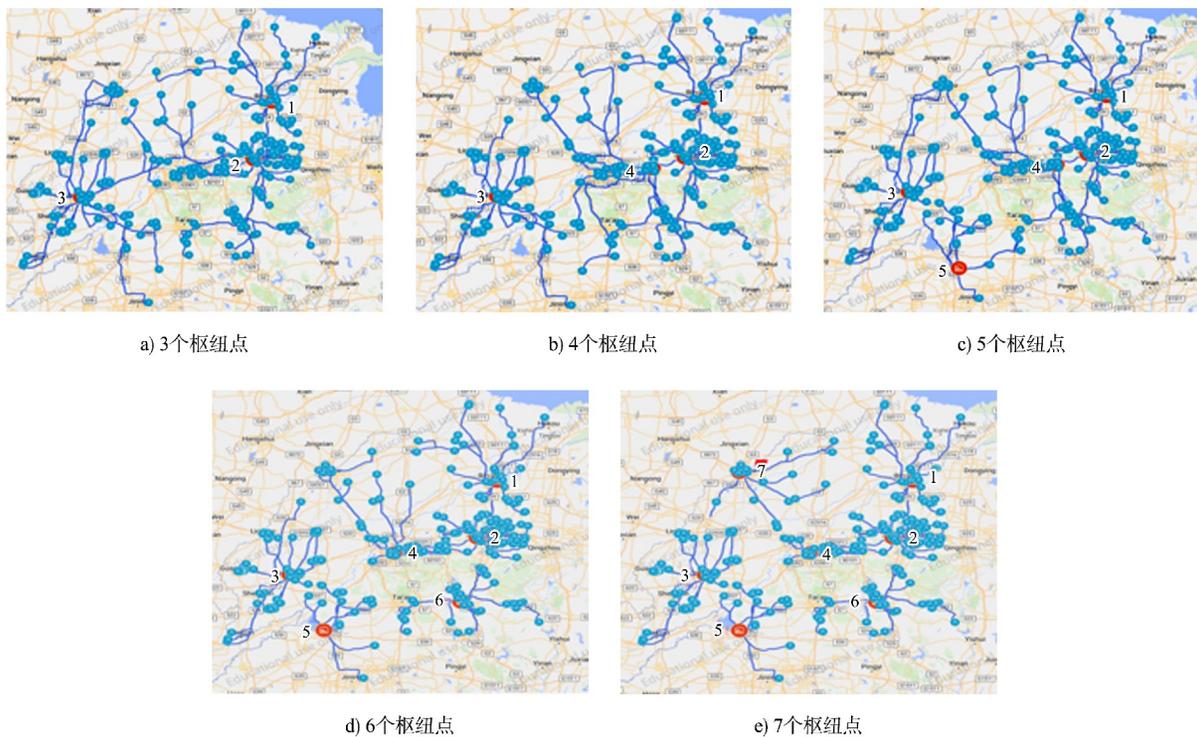


图 3 2030 年枢纽初选位置

Fig. 3 Preliminary selection of hub locations in 2030

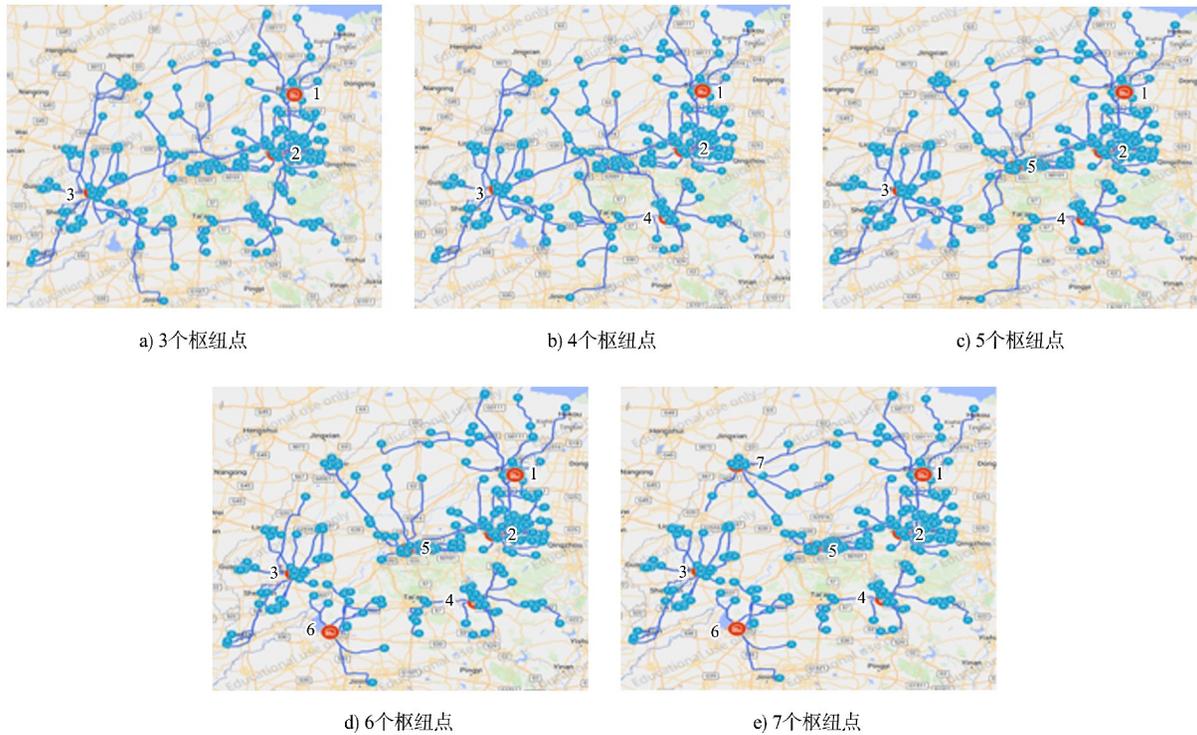


图 4 2035 年枢纽初选位置

Fig. 4 Preliminary selection of hub locations in 2035

3.2 基于 AHP-TOPSIS 的枢纽优选结果

根据表 2 中的评价指标体系,应用 AHP 法建立判断矩阵,经一致性检验后获得组合权重,见表 3。

表 3 组合权重
Tab.3 Composite weight

指标	权重	指标	权重
C_{11}	0.12	C_{22}	0.22
C_{12}	0.27	C_{31}	0.10
C_{21}	0.23	C_{32}	0.06

应用 AHP-TOPSIS 法对初选枢纽进行综合评价,优选分阶段的枢纽选址方案,见表 4。LS 铁路货运站及 DCF 物流园区等在多数情景下被选为枢纽节点,证明其地理位置、发展空间与服务能力等方面的优势;同时 BZHB、JNJC 作业区等多个内河港口作业区频繁被选中且排序较高,验证了内河水运在交通运输领域成本低、排放少的比较优势。部分枢纽在不同阶段的排序不同,主要是由于航道扩能后腹地企业需求发生了时空变化,符合阶段需求演变特征。差异化的排序结果体现了区位优势、服务能力和发展空间的综合作用,

为多阶段优化中权衡改扩建成本与运输效益提供决策依据。然而,不同规划期的货运需求差异对枢纽选址方案提出不同的要求,一方面导致企业运输成本和枢纽运营成本的波动,另一方面枢纽在不同阶段下的发展空间和服务能力均显著影响优选排序。因此需从规划期总效益最优化的角度出发,综合考虑两阶段下的最终选址方案。

表 4 分阶段枢纽优选结果
Tab.4 Optimization result of phased hub

枢纽个数	编号	2030 年	2035 年
3	1	BZHB 作业区	BZHB 作业区
	2	CH 物流园区	CH 物流园区
	3	DCF 物流园区	DCF 物流园区
4	1	BZHB 作业区	BZHB 作业区
	2	ZBHG 作业区	ZBHG 作业区
	3	LC 物流园区	LC 物流园区
	4	JNJC 作业区	LZ 物流园区
5	1	BZHB 作业区	BZHB 作业区
	2	ZBHG 作业区	ZBHG 作业区
	3	DCF 物流园区	DCF 物流园区
	4	JNJC 作业区	LZ 物流园区
	5	LS 铁路货运站	JNJC 作业区

续表4

枢纽个数	编号	2030 年	2035 年
6	1	BZHB 作业区	BZHB 作业区
	2	HE 物流园区	HE 物流园区
	3	DCF 物流园区	DCF 物流园区
	4	JNZC 作业区	LZ 物流园区
	5	LS 铁路货运站	JNZC 作业区
	6	LZ 物流园区	DZ 铁路货运站
7	1	BZHB 作业区	BZHB 作业区
	2	HE 物流园区	HE 物流园区
	3	DCF 物流园区	DCF 物流园区
	4	JNZC 作业区	LZ 物流园区
	5	LS 铁路货运站	JNZC 作业区
	6	LZ 物流园区	LS 铁路货运站
	7	DZ 铁路货运站	DZ 铁路货运站

3.3 枢纽选址方案研究

从综合两个规划期的总效应出发, 考虑目标函数不同权重影响下最小化企业运输和枢纽运营成本之和, 确定不同权重取值方案下最终的枢纽选择数量、位置等信息。根据多目标优化模型, 决策偏好通过权重分配直接影响目标函数值。为系统分析其作用, 研究设定 3 种典型决策情景, 见表 5, 最终计算结果见图 5。

表 5 决策情景设定
Tab. 5 Decision scenario setting

情景	目标 1 权重(企业运输成本)	目标 2 权重(枢纽运营成本)
1	0.5	0.5
2	0.7	0.3
3	0.3	0.7

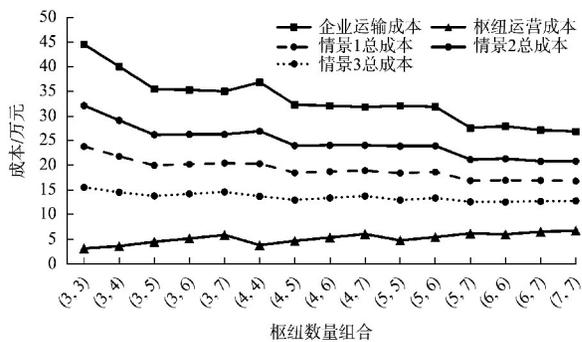


图 5 多阶段枢纽选址各方案目标函数值

Tab. 5 Objective function values of various schemes for multi-stage hub site selection

1) 情景 1(权重均衡): 在第 1 阶段规划 5 个枢纽, 包括 BZHB 作业区、HE 物流园区、DCF 物

流园区、JNZC 作业区和 LS 铁路货运站; 第 2 阶段随着货运量增加, 需要对现有枢纽进一步改扩建, 并新启用 2 个枢纽设施整合入当前运输网络, 包括 LZ 物流园区和 DZ 铁路货运站, 使得规划期总成本最低。

2) 情景 2(侧重企业运输): 在第 1 阶段规划 6 个枢纽, 包括 BZHB 作业区、HE 物流园区、DCF 物流园区、JNZC 作业区、LS 铁路货运站和 LZ 物流园区; 第 2 阶段随着货运量增加, 需要对现有枢纽进一步改扩建, 并新启用 1 个枢纽设施整合入当前运输网络, 包括 DZ 铁路货运站, 使得规划期总成本最低。

3) 情景 3(侧重枢纽运营): 在第 1 阶段规划 6 个枢纽, 包括 BZHB 作业区、HE 物流园区、DCF 物流园区、JNZC 作业区、LS 铁路货运站、LZ 物流园区; 第 2 阶段对现有 6 个枢纽改扩建即可, 不需规划新的联运枢纽, 可适应货运量的增长。

3 种情景相应的规划方案具有不同的针对性: 情景 1 通过两阶段建设规划, 既能避免一次性投入过大, 又能逐步优化运输网络, 具有较强的可操作性; 情景 2 通过前期全面布局, 第 2 阶段仅需新增 1 个枢纽, 降低了建设与管理复杂度, 同时能够满足货运量增长的需求; 情景 3 则通过对现有枢纽的集中改扩建, 避免了新增设施的管理与运营负担。综合来看, 3 种情景在成本控制、需求适应性和资源优化方面各有优势, 需结合区域货运需求、成本目标和枢纽运营能力进行科学评估, 以确保规划方案的经济性、适应性与可持续性。

4 结论

1) 针对内河港口腹地多式联运网络, 统筹企业运输成本和枢纽运营成本, 应对不同规划期的企业货运需求, 构建了内河港口腹地多式联运枢纽选址优化模型。

2) 由于内河港口腹地货运企业多、路网复杂, 模型求解规模大, 提出“初选-优选-优化”3 阶段多式联运货运枢纽选址求解方法, 结合重心法

和 AHP-TOPSIS 法实现枢纽点优选, 优化模型确定各阶段多式联运货运枢纽数量及其对应的货运枢纽。

3) 以某内河航道沿线 5 个港口共 14 个作业区、45 个铁路货运站、282 个货运企业为案例, 求解不同决策偏好下的枢纽选址规划方案, 实现两个规划期内企业运输成本和枢纽运营成本的有效降低和协同优化。

4) 研究为内河港口腹地多式联运网络规划提供了方法论支持, 对进一步降低全社会物流成本、推动物流网络智能化与低碳化转型具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈沿伊, 程盼, 毕珊珊, 等. 区域港口一体化发展下港口腹地范围演变规律研究[J]. 水运工程, 2023(7): 13-19.
CHEN Y Y, CHENG P, BI S S, et al. Evolution law of port hinterland scope under integrated development of regional ports[J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 13-19.
- [2] 邬志华, 唐兵, 李灼. 内河港口物流园区发展相关问题研究[J]. 水运工程, 2012(7): 82-85.
WU Z H, TANG B, LI Z. Key technology on development of inland port logistics park [J]. Port & waterway engineering, 2012(7): 82-85.
- [3] ZHANG X F, LIU C L, PENG Y. Accessibility-based location of international multimodal logistics hubs: a case in China [J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 2022, 18(3): 2163-2190.
- [4] 申皓, 张锦, 孙文杰, 等. 基于货物时间价值的空铁联运转运枢纽选址优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 48-57.
SHEN H, ZHANG J, SUN W J, et al. Optimization of air-rail transshipment hub location based on time value of goods[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(1): 48-57.
- [5] 孙祎峥, 封学军, 陈泪梨, 等. 基于中国运营者视角的海外港口群集装箱枢纽港选址模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 111-120.
SUN Y Z, FENG X J, CHEN M L, et al. Site selection model of container hub ports for overseas port cluster based on the perspective of Chinese port and shipping enterprises [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2025, 53(1): 111-120.
- [6] LENG L L, ZHAO Y W, WANG Z, et al. A novel hyper-heuristic for the biobjective regional low-carbon location-routing problem with multiple constraints [J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1596.
- [7] SHI J H, AGYEMANG K O, CHENG Z L. Optimizing intermodal transport and hub location problem for ECOWAS in the context of improving intra-African trade[J]. Journal of advanced transportation, 2022, 2022(1): 2559663.
- [8] 张祺. 多方博弈下港口集疏运网络规划关键问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
ZHANG Q. Research on the main problems about port collection and distribution network planning under multiplayer game [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [9] 蔡越. 重庆港港口物流集疏运运营效率评价与提升策略[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
CAI Y. Evaluation and improvement strategies for the operational efficiency of logistics collection and distribution in Chongqing Port [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [10] 刘昀涛. 考虑碳排放的多式联运货运枢纽选址研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
LIU Y T. Research on location selection of intermodal freight hub considering carbon emissions[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [11] 邓宇君. 面向北京“外集内配”模式的公铁联运枢纽选址布局研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
DENG Y J. Research on the location plan of the railroad intermodal hubs under the "External Collection and Internal Distribution" mode in Beijing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

(本文编辑 王传瑜)