文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0116 - 10

考虑需求不确定和内陆港拥堵的港口集疏运网络优化

王 丹*, 于松岳, 赵 媛
(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要:需求不确定性与内陆港拥堵问题,对港口集疏运系统的高效运转带来严峻挑战。文章构建了同时考量需求不确定性和内陆港拥堵的港口集疏运网络双层规划模型:上层以内陆港建设成本与拥堵成本最小化为目标,优化内陆港的选址与容量配置;下层以运输成本、转运成本、碳排放成本及时间成本最小为目标,优化运输路径规划。采用遗传算法对模型求解,并基于辽宁港口群及东北腹地数据开展实证分析。结果表明:高等级内陆港可有效吸纳需求扰动、降低拥堵成本,且能通过提升铁路运输占比推动碳排放削减;当鲁棒优化最大遗憾值 $\theta = 0.25$ 时,可实现辽宁港口集疏运网络总成本与稳定性的最优平衡;当碳税设定为 0.5 元/kg 时,能够同时达成最佳的减排效果与拥堵控制效果。

关键词:港口工程;网络优化;港口集疏运网络;需求不确定性;内陆港拥堵
中图分类号:U691 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.013

Optimization of port collection and distribution network considering demand uncertainty and inland port congestion

*Wang Dan**, *Yu Songyue*, *Zhao Yuan*
(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Demand uncertainty and inland port congestion pose significant challenges to the efficient operation of port collection and distribution systems. This paper proposes a bi-level programming model that simultaneously account for demand uncertainty and inland port congestion. The upper-level model optimizes inland port location and capacity configuration by minimizing construction costs and congestion costs, while the lower-level model optimizes transport paths by minimizing transportation costs, transfer costs, carbon emission costs, and time costs. A Genetic Algorithm is employed to solve the model, with empirical analysis based on data from the Liaoning port cluster and its northeastern hinterland. The results show that higher-grade inland ports effectively absorb demand fluctuations and reduce congestion costs, while reducing carbon emissions by increasing the share of railway transport. A maximum regret value of $\theta = 0.25$ achieves the optimal balance between total cost and stability of the Liaoning network. Additionally, a carbon tax of ¥0.5/kg achieves the best emission reduction and congestion control outcomes.

Key words: port engineering; network optimization; port collection and distribution network; demand uncertainty; inland port congestion

港口集疏运网络的效率和可靠性对国际物流系统的运作至关重要,但其发展面临着需求不确定和内陆港拥堵两方面的挑战,且这两者存在相互影响:货源地需求受市场波动、政策变化、突发事件等因素的影响呈现不确定性,当货流量急剧增加时,容易导致内陆港拥堵,从而增加运输时间和物流成本;而内

收稿日期:2025-11-06
基金项目:辽宁省社科基金项目(L25BGL006)资助
第一作者(*通信作者):王 丹(1980—),女,副教授,研究方向为交通运输规划与管理,(E-mail)wangdan8054@126.com
引用格式:王丹,于松岳,赵媛. 考虑需求不确定和内陆港拥堵的港口集疏运网络优化[J]. 中国航海,2026,49(4):116 - 125.
Wang D, Yu S Y, Zhao Y. Optimization of port collection and distribution network considering demand uncertainty and inland port congestion[J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 116 - 125. (in Chinese)

陆港拥堵也会降低运输系统的可靠性,并加剧需求不确定带来的负面效应,导致供应链延误和需求变化。因此,研究需求不确定和内陆港拥堵情境下的港口集疏运网络优化,有助于提升运输效率、降低运营成本,并减少交通拥堵和环境污染。

目前关于港口集疏运网络优化方面的研究涵盖了运输路径选择、运输方式选择和内陆港选址等方面。Halim 等[1]设计了具有分布水平偏好的多目标优化模型来解决内陆港选址和分配问题;赵旭等[2]建立了双层规划模型解决考虑节点失效和货主偏好的选址配流问题;吴鹏等[3]设计了带服务时间窗的多目标优化模型解决多式联运路径选择问题;常征等[4]建立了带有多种等级选择的两阶段选址模型;程兴群等[5]构建了不同碳排放政策下的多式联运路径选择模型;Yin 等[6]构建了多目标规划模型解决腹地划分与运输路径选择问题;Azizi 等[7]研究了具有多容量水平的枢纽选址与分配问题;李兆进等[8]以最小化总运输成本为目标,建立了多式联运路径优化的混合整数规划模型;赵旭等[9]建立了根据需求动态调整内陆港选址和容量及路径规划方案的多目标优化模型;Xie 等[10]建立了考虑运输成本、碳排放成本和内陆港建设成本的多目标优化模型对内陆港进行选择;Pina 等[11]在考虑内陆港容量限制和规模优势的基础上构建了内陆港选址和运输方案的联合优化模型。

随着研究的深入,一些学者开始关注需求不确定性和拥堵对集疏运网络优化的影响。张得志等[12]建立了两阶段随机规划模型研究运输网络枢纽选址及路径规划问题;蒋杰辉等[13]使用分布式模糊集刻画需求的不确定性,构建了物流网络两阶段鲁棒优化模型;Ma 等[14]构建了成本最小化与容量可靠性的不确定规划模型;Hu 等[15]将不确定需求假定为服从正态分布的独立随机变量,建立了带有联合机会约束的随机规划模型;王清斌等[16]使用区间规划法表示不同的需求等级,构建了内陆集疏运网络优化模型;邓明君等[17]通过给定不同需求情景的概率,采用加权平均方法求解最优选址及路径规划问题;李立等[18]使用排队论模型对枢纽处的拥堵进行模拟和量化;刘乐星等[19]采用幂指数描述了拥堵和流量之间的关系;王帮俊等[20]建立了考虑枢纽拥堵和容量限制的模型优化轴辐式物流网络。

尽管现有研究已较为丰富,但均未综合考虑需求波动与内陆港拥堵之间相互影响的关系;且较少考虑政府与企业在港口集疏运网络优化中的作用与关系。因此,本文在同时考虑需求不确定性与内陆港拥堵的基础上,提出了货流需求与拥堵之间的函数关系,并基于政府设施决策与企业运输优化的递推关系,构建了港口集疏运网络优化的双层规划模型。

1　问题描述与建模

1.1　问题描述

港口集疏运网络由海港、内陆港和货源地三种节点,以及各节点间连接的运输路径构成。货物可以从腹地通过某种运输方式运往内陆港,在内陆港完成换装后,再使用某种运输方式运往港口;部分货源地的货物也可以根据实际情况,通过某种运输方式直接运往港口。

港口集疏运网络优化问题主要涉及政府部门和运输企业两个决策主体。政府从设施规划的角度出发对内陆港选址及建设规模进行决策,运输企业则从运输成本出发,选取更符合货主偏好及自身效益的运输方式及路线完成货物运输。考虑到政府决策会决定物流的枢纽节点及容量,进而影响企业的运输路径选择;运输企业对运输路线及运输方式的选择,则会影响不同线路的货流量,进而影响政府在枢纽选址和容量上的决策,本文采用双层规划的方式来建立优化模型,上层模型解决内陆港选址及规模决策问题,下层模型解决运输方式与运输路径选择,以及货流分配问题。

1.2　模型假设

1)只考虑集装箱货物;

2)不考虑各种运输方式的运输能力限制;

3)同一货源地的集装箱货物不分包,且最多经过一次内陆港中转,中转后无集装箱剩余;

4)不同港口之间及不同内陆港之间不存在货流;

5)从内陆港到港口使用铁路运输方式整合运输。

1.3　符号说明

模型中用到的集合、参数及变量见表 1—表 3。

表 1　模型集合说明

Tab. 1　Model set description

集合	定义
I	货源地集合,$i \in I$
J	内陆港集合,$j \in J$
K	港口集合,$k \in K$
L	运输方式集合,$l \in L$($l=1$:公路运输;$l=2$:铁路运输;$l=3$:水路运输)
B	枢纽容量级别集合,$b \in B$
S	需求情景集合,$s \in S$

表2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

参数	定义
α	规模经济系数
ω	内陆港的仓容利用率
h	时间价值系数(元/TEU·h)
z	集疏运网络中转比例
P	内陆港建设个数
M	一个很大的数
k	拥堵程度调节参数
β	拥堵概率曲线非线性程度调节参数
γ	拥堵概率增长速度调节参数
θ	鲁棒优化遗憾值系数
P_s	情景 s 发生的概率
$P_{j(b)}$	在 j 地的 b 级内陆港发生拥堵的概率
$D_{ij(l)}$	使用 l 运输方式从 i 到 j 的运输距离(km)
$D_{ik(l)}$	使用 l 运输方式从 i 到 k 的运输距离(km)
$D_{jk(l)}$	使用 l 运输方式从 j 到 k 的运输距离(km)
C_l	使用 l 运输方式的基本运价(元/TEU·km)
a_l	使用 l 运输方式的箱次费(元/TEU)
$C_{j(b)}$	在 j 地建立 b 级内陆港的建设成本(万元)
$C_{j(l)}$	使用 l 运输方式在 j 内陆港的单位中转成本(元/TEU)
C_{jg}	在 j 内陆港的拥堵成本(元/TEU)
C_p	货物提前到达的堆存成本(元/TEU·h)
C_d	货物延迟到达的惩罚成本(元/TEU·h)
C_s	情景 s 下任意可行解下的下层模型目标函数值
C_{s*}	情景 s 下下层模型的最优目标函数值
w	碳税税率(元/kg)
$R_{j(b)}$	在 j 地建立 b 级内陆港的转运能力(万 TEU)
R_k	港口 k 的吞吐能力(万 TEU)
$\tilde{Q}_i$	腹地 i 的(不确定性)货运量(TEU)
Q_i	腹地 i 的(确定性)货运量(TEU)
Q_j	运输到内陆港 j 的集装箱总量(TEU)
Q_k	运输到港口 k 的集装箱总量(TEU)
T_i	腹地 i 货物送达时间(h)
v_l	使用 l 运输方式的运输速度(km/h)
t_l	使用 l 运输方式的名义转运时间(h)
$t_{j(l)}$	使用 l 运输方式在 j 内陆港的实际转运时间(h)
e_l	使用 l 运输方式的单位碳排放量(kg/TEU·km)
$e_{j(l)}$	使用 l 运输方式在 j 内陆港中转的单位碳排放量(kg/TEU)
E_i	腹地 i 货物期望到达的最早时间(h)
L_i	腹地 i 货物期望到达的最晚时间(h)

表3 模型决策变量

Tab. 3 Model decision variables

决策变量	定义
$q_{ij(l)}$	使用 l 运输方式从 i 到 j 的集装箱运量(TEU)
$q_{ik(l)}$	使用 l 运输方式从 i 到 k 的集装箱运量(TEU)
$q_{jk(l)}$	使用 l 运输方式从 j 到 k 的集装箱运量(TEU)
$X_{ijk(l_1,l_2)}$	0-1 变量,当运输方式为 $i \xrightarrow{l_1} j \xrightarrow{l_2} k$ 时为 1;否则为 0
$X_{ik(l)}$	0-1 变量,当运输方式为 $i \xrightarrow{l} k$ 时为 1;否则为 0
$y_{j(b)}$	0-1 变量,当在 j 地建立 b 级内陆港时为 1;否则为 0

1.4 模型构建

1.4.1 需求不确定性和拥堵的表示

1) 需求不确定性

使用区间不确定集合 $\tilde{Q}_i \in [\bar{Q}_i \pm \hat{Q}_i]$ 表示运输需求不确定性,其中 $\bar{Q}_i$ 为名义运输需求,$\hat{Q}_i$ 为不确定需求的最大扰动量,$\hat{Q}_i = \varepsilon_i \bar{Q}_i$,$\varepsilon_i$ 为扰动系数,表示与名义运输需求的最大偏差。不确定性需求如式(1)。

$$\tilde{Q}_i = \bar{Q}_i \pm \lambda \hat{Q}_i \tag{1}$$

式(1)中,λ 为[-1,1]内的随机数,反映不确定水平,服从均值为0的截断式正态分布。

2) 拥堵概率

内陆港的货流量是基于不确定运输需求产生的,也具有不确定性。本文构建了拥堵概率函数来描述拥堵发生的概率,其中内陆港总货流量与不确定需求相关如式(2)。

$$P_{j(b)} = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{Q_j}{R_{j(b)}}\right)^{\beta}\right) \tag{2}$$

式(2)中,β 为拥堵概率曲线非线性程度的调节参数,γ 为拥堵概率增长速度的调节参数。

$$Q_j = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} q_{ij(l)} \quad \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} q_{ij(l)} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} q_{ik(l)} \geqslant \tilde{Q}_i \quad \forall i \in I \tag{4}$$

3) 拥堵成本

引入拥堵成本函数来量化拥堵,并以拥堵概率及拥堵成本函数之积表示内陆港运营时产生的额外成本 C_{jg} 如式(3)。

$$f(j) = \delta (Q_j)^{\eta} \tag{5}$$

$$C_{jg} = P_j f(j) \tag{6}$$

式(5)和式(6)中,$f(j)$ 为内陆港 j 的拥堵成本;δ 和

η 为拥堵成本相关参数。

4) 拥堵时间

内陆港转运时间与拥堵程度呈正相关,其函数关系如式(4)。

$$t_{j(l)} = t_l\left(1 + k\frac{Q_j}{R_{j(b)}}\right) \tag{7}$$

式(7)中,k 为拥堵程度调节参数。

1.4.2 需求确定性模型

1) 上层模型

上层模型是在政府视角下内陆港选址和规模决策的0-1 规划模型。

$$\min F = \sum_{j\in J}\sum_{b\in B} C_{j(b)}y_{j(b)} + \sum_{j\in J}\sum_{b\in B} y_{j(b)}P_{j(b)}f(j) \tag{8}$$

$$P_{j(b)} = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{Q_j}{R_{j(b)}}\right)^{\beta}\right) \quad \forall j\in J, b\in B \tag{9}$$

$$f(j) = \delta(Q_j)^{\eta} \tag{10}$$

$$\sum_{b\in B} y_{j(b)} \leqslant 1 \quad \forall j\in J \tag{11}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{b\in B} y_{j(b)} = P \tag{12}$$

$$\frac{\sum_{j\in J} Q_j}{\sum_{i\in I} Q_i} \geqslant z \tag{13}$$

式(8)表示最小化总成本的目标,包括内陆港建设成本和拥堵成本;式(9)表示拥堵概率;式(10)表示内陆港的拥堵成本;式(11)表示一地最多建设一种级别的内陆港;式(12)表示建设内陆港的数量约束;式(13)表示内陆港中转比例约束。

2) 下层模型

下层模型是在运输企业视角下,路径规划与货流分配决策的混合整数规划模型。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{14}$$

$$C_1 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L} q_{ij(l)}(C_l D_{ij(l)} + a_l) + \alpha\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} q_{jk(l)}(C_l D_{jk(l)} + a_l) + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} q_{ik(l)}(C_l D_{ik(l)} + a_l) \tag{15}$$

$$C_2 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L} C_{j(l)}q_{ij(l)} \tag{16}$$

$$C_3 = w\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L} e_l q_{ij(l)}D_{ij(l)} + \sum_{j\in J}\sum_{l\in L} e_{j(l)}Q_j + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} e_l q_{jk(l)}D_{jk(l)} + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} e_l q_{ik(l)}D_{ik(l)}\right) \tag{17}$$

$$C_4 = \sum_{i\in I} Q_i[C_p\max(E_i - T_i, 0) + C_d\max(T_i - L_i, 0) + hT_i] \tag{18}$$

$$T_i = \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\left(\frac{D_{ij(l)}}{v_l} + t_{j(l)} + \frac{D_{jk(l)}}{v_l}\right)X_{ijk(l_1,l_2)} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\frac{D_{ik(l)}}{v_l}X_{ik(l)} \quad \forall i\in I \tag{19}$$

$$Q_j = \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} q_{ij(l)} \quad \forall j\in J \tag{20}$$

$$Q_k = \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} q_{ik(l)} + \sum_{j\in J}\sum_{l\in L} q_{jk(l)} \quad \forall k\in K \tag{21}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} X_{ijk(l_1,l_2)} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} X_{ik(l)} = 1 \quad \forall i\in I \tag{22}$$

$$q_{ik(l)} \leqslant X_{ik(l)}\cdot M \quad \forall i\in I, k\in K, l\in L \tag{23}$$

$$q_{ij(l)} \leqslant X_{ijk(l_1,l_2)}\cdot M \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L \tag{24}$$

$$q_{jk(l)} \leqslant X_{ijk(l_1,l_2)}\cdot M \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L \tag{25}$$

$$X_{ijk(l_1,l_2)} \leqslant \sum_{b\in B} y_{j(b)} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L \tag{26}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{l\in L} q_{ij(l)} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} q_{ik(l)} \geqslant Q_i \quad \forall i\in I \tag{27}$$

$$Q_j \leqslant \sum_{b\in B} R_{j(b)}y_{j(b)} \quad \forall j\in J \tag{28}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{l\in L} q_{ij(l)} = \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} q_{jk(l)} \quad \forall j\in J \tag{29}$$

$$Q_k \leqslant R_k \quad \forall k\in K \tag{30}$$

式(14)表示总成本最小的目标,其中总成本包括运输成本、转运成本、碳排放成本和时间成本;式(15)表示运输成本,其中 α 为当货物通过内陆港整合运往港口时的模经济折扣系数;式(16)表示转运成本;式(17)表示碳排放成本;式(18)表示时间成本,包括提前到达的堆存成本和延迟到达的惩罚成本;式(19)表示到达时间,包括运输时间和转运时间;式(20)表示某个内陆港的总箱量;式(21)表示某港口的总箱量,包括直达箱量和中转箱量;式(22)表示腹地的货物不能分割,要么选择直达港口,要么选择从内陆港中转;式(23)—(25)表示只有当路径开通后才会有货流;式(26)表示只有当内陆港开通后才可以进行中转运输;式(27)表示运量要满足运输需求;式(28)表示内陆港容量约束;式(29)表示内陆港的货流平衡;式(30)表示港口吞吐能力约束。

1.4.3 需求不确定性模型

上层模型

$$\min F' = \sum_{s\in S} F_s = \sum_{j\in J}\sum_{b\in B} C_{j(b)}y_{j(b)} +$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{b\in B}\sum_{s\in S}P_s y_{j(b)}P_{j(b)}f(j,s) \tag{31}$$

约束条件同确定性模型。

下层模型

$$\min C' = \sum_{s\in S}P_s C_s(x) =$$

$$\sum_{s\in S}P_s(C_{1s}+C_{2s}+C_{3s}+C_{4s}) =$$

$$\sum_{s\in S}P_s\left\{\sum_{i}^{I}\sum_{j}^{J}\sum_{l}^{L}q_{ij(ls)}(C_l D_{ij(l)}+a_l)+\right.$$

$$\alpha_l\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}q_{jk(ls)}(C_l D_{jk(l)}+a_l)+$$

$$\left.\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}q_{ik(ls)}(C_l D_{ik(l)}+a_l)+\right.$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}C_{j(l)}q_{ij(ls)}+w\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}e_l q_{ij(ls)}D_{ij(l)}+\right.$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}e_{j(l)}Q_{j(s)}+\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}e_l q_{jk(ls)}D_{jk(l)}+$$

$$\left.\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}e_l q_{ik(ls)}D_{ik(l)}\right)+$$

$$Q_{i(s)}[C_p\max(E_i-T_{i(s)},0)+$$

$$C_d\max(T_{i(s)}-L_i,0)+hT_{i(s)}] \tag{32}$$

$$C_s(x)\leqslant(1+\theta)C_{s*}\quad\forall s\in S \tag{33}$$

$$\sum_{s\in S}P_s = 1 \tag{34}$$

其他约束条件同确定性模型。

式(31)和(32)表示基于不确定需求情景下港口集疏运网络优化的目标函数;式(33)表示模型最优解的鲁棒约束,基于最小化最大遗憾值(Min-Max Regret)的鲁棒优化模型得到,表示在任意情景 s 下可行解与最优解的遗憾值不超过 θ,θ 为“最大遗憾值系数”,其物理意义是决策者所能接受的、在任意情景下方案成本与理想最优成本之间的最大相对差距,它反映了决策者的风险偏好;式(34)表示所有情景发生的概率和为 1。

2 算法设计

2.1 算法思路

本文所建立的模型为双层规划,上层为 0-1 整数规划,下层为混合整数规划问题,属于 NP-hard 问题。模型具体求解思路为:上层模型用遗传算法生成内陆港的选址与等级配置初始方案,该方案被传递给下层模型以搭建港口集疏运网络;下层模型在此基础上,以企业总成本最小化为目标,利用 GUROBI 求解器优化得出具体的运输路径及运输方式的货流分配方案,此货流分配方案会影响内陆港的实际货流量和拥堵成本,故将其作为反馈信号传递至上层用于评估方案优劣,从而引导遗传算法对上层方案进行迭代优化。此过程一直如此循环迭代下去,直到模型结果趋于收敛。

2.2 算法流程

1)编码及初始化

上层模型为 0-1 整数规划,因此采用 0-1 编码方式进行染色体编码。初始化编码如图 1 所示,随机生成满足上层约束条件的初始种群,种群规模为 150。



图 1 初始化编码

Fig. 1 Initial encoding

2)求解下层模型

将初始化种群作为上层已知解 Y,代入下层混合整数规划模型,利用 python 调用 GUROBI 求解器进行求解得到下层最优解 X,并传递给上层模型。

3)计算适应度函数

根据所求得的下层最优解计算个体适应度。由于上层模型所求解的问题为最小化问题,因此对上层目标函数取倒数建立适应度函数如式(35)和(36)所示。

$$f = F + M\left(z-\frac{\sum_{j}^{J}Q_j}{\sum_{i}^{I}Q_i}\right)+\sigma \tag{35}$$

$$f_{\text{itness}} = 1/f \tag{36}$$

式(35)和(36)中,f 为上层目标函数;f_{itness} 为适应度函数;σ 是一个很小的数,避免适应度函数分母为 0;M 为一个很大的数,这部分是将约束条件式(13)进行罚函数转换得到。

4)选择

采用轮盘赌选择法作为选择算子,该方法依据个体的适应度值计算其被选中的概率,适应度越高的个体,被选中作为父代进行繁殖的概率越大。

5)交叉和变异

如果满足交叉概率条件,每次交叉选取两个父代,并在它们的基因中随机选择一个点作为交叉点,然后交换这个点之后的基因段。如果不发生交叉,则子代直接继承父代的基因,单点交叉示意如图 2 所示。

同时,在后代中引入变异,对于每个个体,函数随机选择一个基因点。如果满足变异概率条件,则该点上的基因值被反转,变异示意如图 3 所示。

在文献共识和参数测试的基础上,将交叉概率设为 0.8,变异概率设为 0.05。

6)保留精英个体

保留种群中适应度最高的前 10% 的精英个体

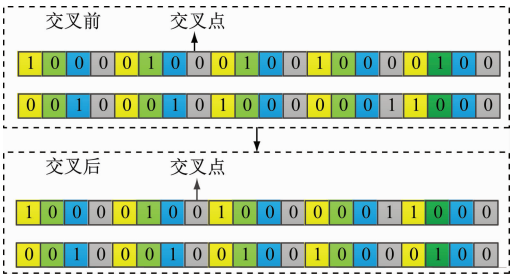


图 2　单点交叉示意

Fig. 2　Schematic diagram of single-point crossover

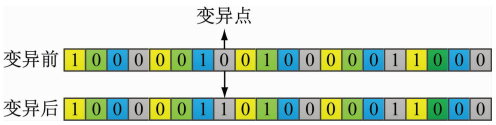


图 3　变异示意

Fig. 3　Schematic diagram of mutation

不参与交叉变异,直接作为新的个体进入下次循环。

7）检验种群个体可行性

对新的种群中的每一个个体进行检验,要求满足上层模型中的式(8)和式(9),即每个备选内陆港城市最多建立一种级别的内陆港,整个网络中建立 P 个内陆港。

8）循环迭代

对模型进行测试后发现算法在 40 次迭代后趋于收敛,如图 4 所示,故指定算法迭代次数为 100。

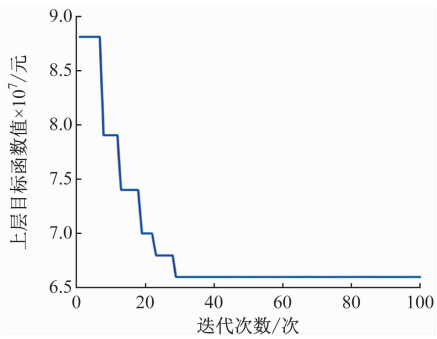


图 4　算法迭代图

Fig. 4　Algorithm iteration plot

3　实证分析

本文选取辽宁省 6 大沿海港口以及东北地区 41 个主要城市及地区作为研究对象。

3.1　数据获取

1）出口需求

基于式(37),对出口需求进行计算,得到货源地集装箱出口需求。

$$Q_i = V_i \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \gamma \tag{37}$$

式(37)中,Q_i 为货源地出口需求,V_i 为全市出口总值,K_1 为集装箱货物占比,一般取 80%,K_2 为集装箱换算系数,取值为 0.35(TEU/万美元),γ 为出口量增长系数,取值 1.3。

2）运输价格、速度、碳排放系数

通过查询交通运输部及铁路部门对货物运输费用的相关规定,以及相关文献,得到各运输方式的运输价格、速度及碳排放系数如表 4 所示。

表 4　运输价格

Tab. 4　Transportation price

参数	公路运输	铁路运输
基本运价(元/TEU · km)	6.00	1.98
箱次费(元/TEU)	10	500
转运费率(元/TEU)	100	80
运输碳排放系数(kg/TEU · km)	1.51	0.311
转运碳排放系数(kg/TEU)	5.8	3
运输速度(km/h)	100	60
中转速度(h)	12	8

3）腹地期望到达时间

根据腹地与海岸线距离,设定各腹地货物运输期望送达港口的时间窗。

4）内陆港规模及费用

参考同规模内陆港投资情况,各备选内陆港建造规模及所需建设成本如表 5 所示。

表 5　内陆港建设规模及费用

Tab. 5　Construction scale and cost of inland ports

等级	转运能力/万 TEU	建设成本/万元
1	5	2 000
2	10	4 000
3	20	8 000
4	40	16 000

5）其他数据

假设拥堵程度参数 $k=0.5$,拥堵概率调节参数 $\gamma=7$,$\beta=3$;拥堵成本相关参数 $\delta=0.1$,$\eta=1.5$;集装箱堆存成本及延迟成本分别为 30 元/TEU · h 和 15 元/TEU · h;内陆港建设个数 $P=5$,集疏运网络集装箱中转比例不低于 60%;规模经济折扣系数 $\alpha=0.8$;碳税价格为 40 USD/t,即 $w=0.3$ 元/kg。

3.2　模型求解

3.2.1　需求确定性模型

1）不考虑拥堵

若不考虑内陆港的拥堵,即在上层模型中只考虑内陆港的建设成本,得到的结果如表 6 所示。这表明,如果不考虑内陆港拥堵会使得决策者更倾向于选择更低等级的内陆港。

表6 确定需求下不考虑内陆港拥堵的内陆港布局

Tab.6 Inland port layout under deterministic demand without congestion consideration

内陆港	等级	货运量/TEU	对应港口	仓容利用率/%
牡丹江	1	43 781	大连港	88
佳木斯	1	19 843	大连港	40
长春	4	260 606	盘锦港	65
吉林	1	26 360	盘锦港	53
沈阳	4	300 260	营口港	75

2）考虑拥堵

对考虑内陆港拥堵的确定性模型进行求解，得到内陆港布局如表7所示。

表7 确定需求下考虑内陆港拥堵的内陆港布局

Tab.7 Inland port layout under deterministic demand with congestion consideration

内陆港	等级	货运量/TEU	对应港口	仓容利用率/%
哈尔滨	4	150 827	大连港	38
齐齐哈尔	1	46 036	大连港	92
牡丹江	1	43 781	大连港	88
长春	2	93 161	盘锦港	93
沈阳	4	296 819	营口港	74

3.2.2 需求不确定性模型

本文考虑内陆港拥堵，在最大遗憾值 $\theta=0.2$ 下研究需求不确定的影响。假设在 $[-1,1]$ 内 $\lambda \sim N(0,1)$ 服从标准正态分布，$\varepsilon_i=30\%$，模型求解结果如表8所示。

表8 不确定需求下考虑内陆港拥堵的内陆港布局

Tab.8 Inland port layout under uncertain demand considering congestion

内陆港	等级	平均货运量/TEU	对应港口	平均仓容利用率/%
哈尔滨	4	161 087	大连港	40
牡丹江	2	60 291	大连港	60
长春	3	119 108	盘锦港	60
沈阳	4	298 783	营口港	75
通辽	1	37 586	锦州港	75

3.2.3 不同模型结果的比较

进一步对不同模型下的成本、时间、碳排放和中转比例进行了对比，结果如表9所示。

表9 不同模型的计算结果对比

Tab.9 Comparison of computational results for different models

比较项目	需求确定不考虑拥堵	需求确定考虑拥堵	需求不确定考虑拥堵
内陆港等级策略	低等级为主	低等级向高等级过渡	高等级为主
建设成本/万元	3 800	4 000	4 600
拥堵成本/万元	2 827	2 180	2 393
上层总成本/万元	6 627	6 180	6 993
下层总成本/万元	175 653	164 286	170 926
碳排放量/万t	20 152	19 768	20 207
运输总时间/h	612	569	713
转运时间/h	279	246	264
内陆港中转比例/%	64	62	66

1）内陆港布局与等级选择

需求确定不考虑拥堵时，决策者倾向于选择建设成本较低的低等级内陆港。虽然这种选择降低了建设成本，但其拥堵成本和碳排放较高。引入拥堵因素后，决策者倾向于选择高等级内陆港，高等级内陆港提供更大的容量，缓解了交通拥堵，从而减少了整体的运输成本和碳排放。当进一步考虑需求不确定性时，系统的设计更加保守，选择了更高等级的内陆港。

2）成本分析

在需求确定不考虑拥堵的情况下，建设成本较低，但由于无法有效应对拥堵问题，整体运营成本较高。而在需求确定考虑拥堵的情况下，建设成本有所增加，但拥堵成本和运输成本得到了有效控制，系统整体效率提高，这说明高等级基础设施具有长期经济性。考虑需求不确定性时，建设成本进一步增加15%，但运输成本和碳排放仅有小幅上升，这说明合理的集疏运网络设计能在控制拥堵和应对不确定干扰的同时将总成本保持在较低水平。

此外，在所有情况下，考虑拥堵时比不考虑拥堵时碳排放量低，这是因为考虑拥堵后企业会规避拥堵节点，选择更高等级的内陆港，一方面减少了车辆的怠速排放，另一方面高等级的内陆港能整合更多铁路运输，减少碳排放较大的公路运输比例。

3）运输效率与时间

在需求确定不考虑拥堵的情况下，运输时间较

长,转运时间也较高。考虑拥堵能显著降低运输和转运时间,提升运输效率。当需求不确定时,由于需要应对需求波动,运输时间有所增加。

从货物中转比例上看,需求不确定考虑拥堵时,内陆港的中转比例最高,这表明内陆港在吸收需求波动时能起到类似"蓄水池"的缓冲作用,增强了网络的稳定性。与此相对,需求确定考虑拥堵时,中转比例有所降低,更多货物选择直达运输方式。

3.3　灵敏性分析

3.3.1　鲁棒优化最大遗憾值灵敏性分析

最大遗憾值 θ 用于衡量模型对风险的容忍度,θ 值越小,意味着决策者越保守,愿意支付更高成本来规避最坏的情况。结果如表 10 所示,这表明,随着 θ 从 0.1 增至 0.3,上层成本呈现小幅上升趋势(增幅约 2.7%),而下层成本则显著降低(降幅达 20.3%)。这种变化源于 θ 对模型保守程度的调控:当 θ 较小时(如 $\theta=0.1$),模型为应对极端需求情景强制保留大量冗余运力,导致运输成本居高不下。在 $\theta=0.25$ 时系统实现最优平衡—总成本降至最低值,此时模型在控制极端情景损失(最大遗憾值≤25%)与降低常态运营成本之间取得有效平衡。

表 10　最大遗憾值灵敏性分析

Tab. 10　Sensitivity analysis of the maximum regret value

单位:万元

θ	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
上层成本	6 949	6 933	6 993	7 139	7 139
下层成本	200 634	199 933	170 926	159 939	159 941
总成本	207 583	206 867	177 919	167 078	167 080

3.3.2　碳税价格灵敏性分析

碳税价格是影响运输成本和碳排放量的关键参数。假设碳税价格从 0.1 元/kg 到 0.9 元/kg,分析其对运输网络优化的影响,得到各指标变化如表 11 所示。结果表明,随着碳税价格的上升,碳排放量呈下降趋势,而拥堵成本、运输时间和内陆港中转比例出现上升趋势。这是因为公路运输的碳排放系数显著高于铁路,碳税提高时公路运输成本的增幅更大,为了降低碳税成本,企业会将更多货物从公路转向铁路,而铁路运输必须经内陆港中转,内陆港的货流增大导致拥堵成本增加。

进一步分析可以发现:碳税为 0.1 时低减排激励不足;碳税为 0.5 时综合效果最佳,排放降 5.3% 且拥堵可控(拥堵成本 +3.3%);碳税为 0.9 时排放仅比 0.5 时降 1.7%,但拥堵成本增加 5.3%。这表明碳税设定为 0.5 元/kg 左右时比较合理,如果碳税过高则需另外配套治理拥堵措施。

表 11　碳税价格灵敏性分析

Tab. 11　Sensitivity analysis of carbon tax price

碳税价格/(元/kg)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
拥堵成本/万元	2 385	2 393	2 456	2 563	2 586
碳排放量/万 t	20 609	20 207	19 522	19 212	19 181
内陆港中转比例/%	66	66	67	68	68

3.3.3　时间价值系数灵敏性分析

时间价值系数反映了货物运输时间对成本的影响,本文对比分析时间价值较低到较高的不同情景,在[0,2]元/TEU·h 范围内逐步增加时间价值系数,结果如表 12 所示。结果表明:对时间不敏感时,货主优先选择低成本多式联运;随着时间价值增加,速度更快的公路直达运输比例上升,内陆港中转比例逐渐下降,但会带来更高的运输成本和碳排放量。

表 12　时间价值系数灵敏性分析

Tab. 12　Sensitivity analysis of time value coefficient

时间价值/(元/TEU·h)	0	0.5	1	1.5	2
下层总成本/万元	171 610	169 642	170 926	173 876	177 269
碳排放量/万 t	19 789	19 825	20 207	20 498	20 863
转运时间/h	282	275	264	265	262
内陆港中转比例/%	67	67	66	65	64

3.3.4　需求不确定扰动系数灵敏性分析

为了分析需求不确定性对集疏运网络优化的影响,本文对需求不确定扰动系数 δ 进行了灵敏性分析,结果如表 13 所示。结果表明,随着 δ 从 0.1 增至 0.5,建设成本增长 15%,拥堵成本上升 1.6%。这说明需求波动不仅增加了投资高等级内陆港的基建成本,还会因扰动加剧引发枢纽负荷波动幅度扩大,从而放大拥堵成本。

表13 需求不确定扰动系数灵敏性分析

Tab. 13 Sensitivity analysis of demand uncertainty disturbance coefficient 单位:万元

扰动系数	0.1	0.3	0.5
建设成本	4 000	4 600	4 600
拥堵成本	2 232	2 393	2 431

4 结 论

本文构建了一个双层规划模型,对同时存在需求不确定和内陆港拥堵的港口集疏运网络进行优化,研究发现:1)考虑拥堵与需求不确定性会使内陆港建设成本增加,但高等级枢纽的规模效应能显著降低拥堵成本,并通过铁路运输比例的提升推动碳排放减少;2)在需求波动率超过30%的场景下,高等级内陆港可有效吸收需求扰动,将运输成本增幅控制在4%以内,也验证了本模型网络设计的有效性;3)鲁棒优化最大遗憾值$\theta=0.25$时可实现成本与稳定性的最优平衡,碳税为0.5元/kg时能实现最佳的减排和拥堵控制效果。

基于本文的相关分析,提出以下政策建议:一是政府应优先在需求波动高的区域部署高等级内陆港,并鼓励企业积极参与高等级枢纽共建项目;二是决策者可根据风险偏好来设定网络鲁棒优化的最大遗憾值,以在控制极端情景损失与降低常态运营成本之间取得最佳平衡;三是碳税不可设置过高,否则会增加内陆港拥堵的概率,可通过"碳税+拥堵费"联动机制引导运输结构优化;四是当货物时间价值<1.5元/TEU·h时,货主可优先选择使用内陆港中转的多式联运模式以降低总成本;五是在腹地经济波动和需求不确定性较高的区域,应配套动态运力调度机制和一定比例的应急转运能力,以提高系统的稳定性。

参 考 文 献

[1] Halim R A, Kwakkel J H, Tavasszy L A. A strategic model of port-hinterland freight distribution networks [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 368-384.

[2] 赵旭,张瑶,张汇妍. 基于双层规划的港口集疏运网络优化模型[J]. 工业工程与管理,2023,28(3):1-8.
Zhao X, Zhang Y, Zhang H Y. Optimal model of port gathering and distribution network based on Bi-level programming [J]. Industrial Engineering and Management, 2023, 28(3): 1-8. (in Chinese)

[3] 吴鹏,季海涛,林峰,等. 带服务时间窗的绿色多式联运路径和速度多目标优化[J]. 运筹与管理,2024,33(4):35-41.
Wu P, Ji H T, Lin F, et al. Multi-objective optimization for green multimodal transportation path and speed with service time windows [J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(4): 35-41. (in Chinese)

[4] 常征,齐壮,吕靖. 带有多重能力等级选择的内陆港选址问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(3):184-191.
Chang Z, Qi Z, Lv J. Inland port location problem with multiple capacity level choices [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 184-191. (in Chinese)

[5] 程兴群,金淳. 低碳政策下考虑道路拥堵的多式联运路径选择问题[J]. 运筹与管理,2019,28(4):67-77.
Cheng X Q, Jin C. Multimodal transportation route selection considering road congestion under low-carbon policies [J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(4): 67-77. (in Chinese)

[6] Yin C Z, Ke Y D, Chen J H, et al. Interrelations between sea hub ports and inland hinterlands: perspectives of multimodal freight transport organization and low carbon emissions [J]. Ocean & Coastal Management, 2021, 214: 105919.

[7] Azizi N, Salhi S. Reliable hub-and-spoke systems with multiple capacity levels and flow dependent discount factor [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 298(3): 834-854.

[8] 李兆进,刘雅,杨臻. 考虑订单合并和货物转运的多式联运路径优化研究[J]. 运筹与管理,2022,31(4):28-34.
Li Z J, Liu Y, Yang Z. Research on multimodal transportation path optimization considering order consolidation and cargo transshipment [J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(4): 28-34. (in Chinese)

[9] 赵旭,黄静韵,张瑶. 需求波动下多目标多周期内陆港动态布局优化[J]. 上海海事大学学报,2022,43(4):67-74.
Zhao X, Huang J Y, Zhang Y. Dynamic layout optimization of inland ports with multi-objective and multi-period under demand fluctuation [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022, 43(4): 67-74. (in Chinese)

[10] Xie J C, Sun Y R, Huo X. Dry port-seaport logistics network construction under the belt and road initiative: a case of Shandong Province in China [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2021, 30

(2): 178-197.

[11] Pian F, Shi Q J, Yao X, et al. Joint optimization of a dry port with multilevel location and container transportation: the case of northeast China [J]. Complexity, 2021, 2021: 5584600.

[12] 张得志,张方涛,陈婉茹,等. 需求不确定下的中欧班列国际运输网络设计优化[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(11):2841-2848.
Zhang D Z, Zhang F T, Chen W R, et al. Optimization of international transportation network of China railway express under demand uncertainty [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(11): 2841-2848. (in Chinese)

[13] 蒋杰辉,盛典. 考虑低碳政策和不确定需求的物流网络鲁棒优化[J]. 运筹与管理,2024,33(8):79-85.
Jiang J H, Sheng D. Robust optimization of logistics network considering low-carbon policies and uncertain demand [J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(8): 79-85. (in Chinese)

[14] Ma J C, Wang X F, Yang K, et al. Uncertain programming model for the cross-border multimodal container transport system based on inland ports [J]. Axioms, 2023, 12(2): 132.

[15] Hu Q M, Hu S L, Wang J, et al. Stochastic single allocation hub location problems with balanced utilization of hub capacities [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 153: 204-227.

[16] 王清斌,都晓惠,孟凡锋. 基于改进区间规划方法的内陆集疏运网络优化[J]. 铁道运输与经济,2021,43(7):79-86.
Wang Q B, Du X H, Meng F F. Optimization of inland collection and distribution network based on improved interval programming method [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 79-86. (in Chinese)

[17] 邓明君,代玉珍,李响. 需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化[J]. 工业工程,2023,26(4):104-113.
Deng M J, Dai Y Z, Li X. Robust optimization of multi-modal transportation routing with low-carbon under demand uncertainty [J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(4): 104-113. (in Chinese)

[18] 李立,黄理莹,牟玲玲. 枢纽拥堵状况下绿色多式联运路径选择不确定性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(7):1854-1861.
Li L, Huang L Y, Mou L L. Uncertainty for route selection in green intermodal transportation under hub congestion [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1854-1861. (in Chinese)

[19] 刘乐星,梁红艳. 考虑拥堵与环境成本的疏运网络货流分配研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(1):197-202.
Liu L X, Liang H Y. Research on freight flow allocation in transport network considering congestion and environmental costs [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47(1): 197-202. (in Chinese)

[20] 王帮俊,赵伟,朱伟. 考虑拥堵和容量限制的多式联运轴辐式物流网络布局优化研究[J]. 工业工程与管理,2022,27(1):65-73.
Wang B J, Zhao W, Zhu W. Research on layout optimization of multi-modal hub and spoke logistics network considering congestion and capacity limitation [J]. Industrial Engineering and Management, 2022, 27(1): 65-73. (in Chinese)