

基于海铁联运的港口群陆侧海铁协同空箱调运研究

冯海文

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年2月19日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月26日

摘要

海铁联运的快速发展加速推动了港口群陆侧铁路网络的建设, 未来港区一体化不断加快, 针对海铁联运方式下的港口群陆侧空箱调运模式, 进行海铁协同的空箱调运模式, 以满足出口导向型国家, 海铁联运模式下的港口群陆侧空箱资源调配方案。为有效降低系统空箱调运总成, 提高空箱周转率, 本文以出口导向型国家的港口群及腹地区域为研究对象, 考虑由班轮公司与班列公司组成的海铁联运港口群陆侧运输系统, 基于多式联运经营人视角, 建立了一个多周期混合整数规划模型。模型考虑港口间、港站间和场站间的空箱调运, 考虑系统产生的空箱调运成本、租箱成本和堆存成本, 使得系统总成本最低。并以西部陆海通道的海铁联运港口群陆侧运输系统为案例, 进行算例实验研究。算例结果显示, 海铁协同下的空箱调运模式, 有效地降低了海铁联运运输方式下陆侧系统空箱调运成本。

关键词

海铁联运, 空箱调运, 集装箱共享, 混合整数规划模型

Research on Empty Container Dispatching Based on Sea-Rail Intermodal Transport of Port Group on Land-Side Sea-Rail Cooperation

Haiwen Feng

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: February 19, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 26, 2026

Abstract

The rapid development of rail combined transport has accelerated the construction of the landside

railway network of the port group, and the integration of the port area will continue to accelerate in the future. For the land-side empty container allocation mode of the port group under the sea-rail intermodal transport mode, a sea-rail coordinated empty container allocation mode will be carried out. In order to meet the export-oriented country, the land-side empty container resource allocation scheme of the port group under the sea-rail intermodal transport mode. In order to effectively reduce the empty container transportation assembly of the system and increase the empty container turnover rate, this paper takes the port group and hinterland area of export-oriented countries as the research object, and considers the land-side transportation system of sea-rail intermodal transport port group composed of liner companies and train companies. Based on the perspective of multi-modal transport operators, a multi-period mixed integer programming model is established. The model considers the empty container transportation between ports, ports and stations, and considers the cost of empty container transportation, container rental cost and storage cost generated by the system, so that the total cost of the system is the lowest. Taking the land-side transportation system of the sea-rail intermodal transport group in the western land-sea corridor as a case, the experimental study is carried out. The example results show that the empty container dispatching mode under the sea-rail coordination can effectively reduce the cost of empty container dispatching in the land-side system under the sea-rail intermodal transport mode.

Keywords

Sea-Rail Intermodal Transport, Empty Container Transportation, Container Sharing, Mixed Integer Programming Model

Copyright © 2026 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

全球贸易长期存在的进出口结构性失衡，导致集装箱物流网络持续面临空箱调运的压力。出口导向型港口常因货流单向性而出现用箱短缺，进口主导型港口则周期性堆积大量空箱，因而在集装箱过剩与短缺地区之间进行大规模、常态化的空箱调运。同时随着“一带一路”倡议的提出，海铁联运等运输模式迅猛发展，“一单制”、“一箱制”等新型海铁联运模式也随之而生，数据显示，2024年，我国集装箱多式联运量同比增长15.6%。全国主要港口集装箱铁水联运量同比增长16.5%。

随着我国沿海港口空箱积压问题日益严重与内陆地区空箱供应紧张的双重挑战并存，如何提高港口与内陆腹地间的空箱周转效率成了值得关注的问题。但传统的港口陆侧空箱调运系统往往采用“单港对单站”的服务方式，即港口仅与其直接腹地产生空箱调运，这种服务方式已经无法满足港口的实时需求，产生协作关系不融洽，空箱调运效率低的情况，因此有必要以港口群为服务范围。并且，在传统的海铁联运场景中，船公司和铁路公司合作完成货物从托运人到收货人，铁路公司负责将托运人的货物从内陆场站运到起运港，以及目的港到收货人目的地场站的运输。船公司负责海运段，将托运人货物从起运港运到目的港。但未来随着“一箱制”、“一单制”的不断发展，多式联运经营人的角色将会成为联运必不可少的角色。多式联运经营人将会负责场站到港口的运输，并可以调配整个港口陆侧的空箱资源。

关于空箱调运问题，学者们已经开展了大量的相关研究，在海运方面，Crainic等[1]以港口与场站以及客户之间的内陆空箱调运为研究对象，建立了动态模型。Wang等[2]研究了具有空集装箱重新定位问题的班轮运输枢纽位置，并开发了一个混合整数模型来最小化总运输成本。计明军等[3]提出了不确定目

的港策略并采用遗传算法对调运模型进行了求解。SONG 等[4]针对多航线多船多航次的航运网络空箱调运优化问题,提出了基于两阶段的最短路法和基于两阶段的启发式算法求解该问题,并运用实例对比两种方法的优劣。Liang 等[5]研究了新颖的动态空箱舱位分配策略,提出了一个随机动态规划(DP)模型来优化插槽分配决策。

关于铁路空箱调运问题,张高鹏[6]的研究中考虑了车种以及箱种代用对铁路集装箱空箱调运的影响,并用算例证明了箱种代用对集装箱空箱调配起到了优化作用。石红国等[7]提出了基于运达时间约束的集装箱空箱随机机会模型,并设计了基于 TOPSIS 的限定参数区间搜索算法。段刚等[8]以铁路运输利润最大化综合考虑重空箱运输,建立了按所需集装箱类型不同建立非线性混合整数规划模型。师志鸿等[9]提出了鲁棒软时间窗和箱种代用集装箱空箱调运模型,并最终简化为整数线性规划进行求解。Chen 等[10]考虑了随机需求背景下内陆货运站空箱配置优化问题,开发了一种新的集装箱库存管理模型,提出了一种新的空箱资源配置方法,设计了一种二叉搜索和差分进化算法。

关于海陆协同的空箱调运研究,Katarzyna 等[11]基于欧亚间贸易严重不平衡现状,以文献综述的形式分析各种欧亚多式联运空箱调运模型和解决方案。詹斌等[12]在海港间调运空箱和海陆间调运空箱的基础上,创新地增加了无水港间调运空箱的方式,将“单站对多港”升级为“多站对多港、多站对多站”的模式,建立了一个多周期混合整数规划模型。Xie 等[13]研究了由一家内陆无水港的铁路运输公司和一家海港的班轮公司组成的多式联运系统的空箱调运问题,探讨了铁路箱与海运箱的共享与最优调运策略,指出了空箱共享与合作能给双方带来的收益。徐华锋等[14]提出“共享模式”下的海铁协同集装箱空箱调运策略,即港口群及其经济腹地范围内,各铁路货运站资源及空箱资源均为共享的海铁协同空箱调运方案。

以上研究可以看出,空箱调运问题的不再仅考虑单一运输方式,越来越关注海陆协同的形式,但针对港口群陆侧的海铁协同空箱调运,当前研究侧重为站在船公司或铁路公司的单一视角,并未在海铁联运视角,而仅以海运视角下的陆侧运输未研究对象,并未综合考虑铁路箱下水的可行性,以系统视角考虑系统总成本最低的情况,因而本文综合考虑多周期、多种运输方式、空箱共享等因素,以出口导向型国家的港口群及其陆侧腹地地区为研究对象,站在多式联运经营人视角研究在海铁联运运输方式与海运方式出口的情况下,港口群陆侧空箱调运问题。并在此基础上建立数学模型,设置相应算例以验证模型的可行性。

2. 问题描述

本文研究了一个国际多式联运的陆侧运输网络,用于出口集装箱货物,包括港口和内陆场站节点。港口和内陆场站节点都可以作为出口运输起点,取决于托运人需求在哪个节点产生。当陆侧托运人存在出口货物的需求,他们可以选择将货物送到腹地的场站或者直接送到海港。运往海港的货物由班轮公司或者货代来负责,班轮公司直接使用港口的空箱库存来满足托运人的运输需求,由海港直接通过海运出口,货物出口模式如图 1 所示。运往腹地场站的货物通过班列公司在场站的空箱库存来满足运输需求,通过铁路运输运往海港,再由海运出口,此时假设在“一箱制”的发展下,班列公司的铁路箱是符合下水标准的集装箱。但是由于托运人的需求存在不确定性,当场站或者港口的空箱库存无法满足需求时,多式联运经营人可以通过调配港口群陆侧区域的空箱来满足港口和场站的空箱需求。

场站的空箱需求短缺时其他场站的铁路箱库存来满足需求,也可以通过共享本场站的海运箱库存来满足需求,但场站的海运箱库存需要优先满足港口的空箱需求,当班轮公司在港口产生空箱短缺时会调运场站的空箱库存。当港口空箱富余时,所有处于公共腹地的场站可以调用其服务的任意港口的空箱库存来满足需求。还可以通过租箱来满足空箱需求。

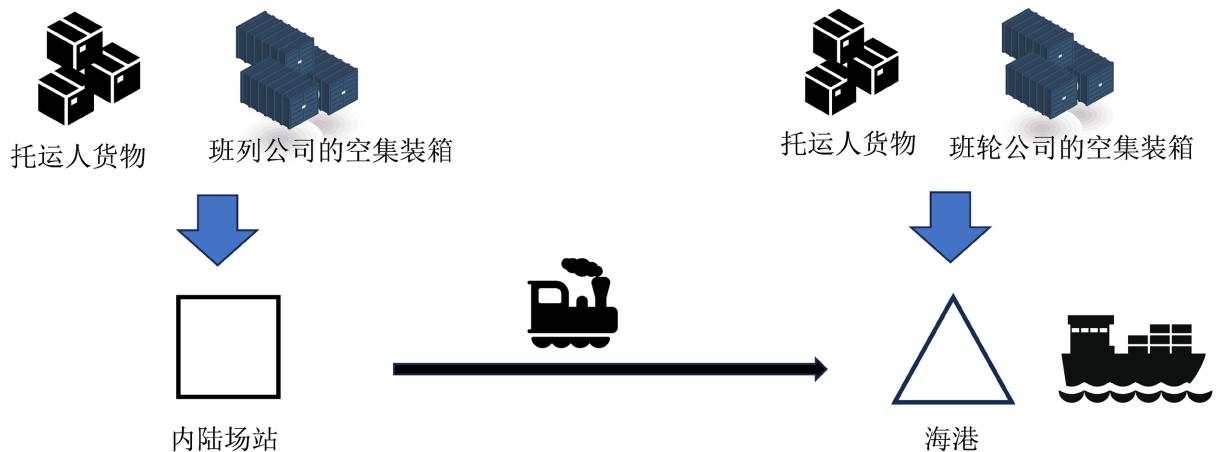


Figure 1. Schematic diagram of shipper's cargo export
图 1. 托运人货物出口示意图

港口的空箱需求短缺时，可以通过调运班轮公司在其他港口的空箱库存、公共腹地场站所有服务港口的场站的海运箱空箱库存，以及通过租箱来满足港口的空箱需求。多式联运经营人也就拥有调运班轮公司和班列公司空箱的权利，以此帮助其规划海铁联运运输的空箱需求。在这样一个港口陆侧的运输系统中，多式联运经营人不拥有任何资产和所有权，但可以在一定的范围内自由支配。

3. 模型构建

3.1. 前提假设

本文结合海铁联运实际操作，基于问题特征与建模需求，提出以下基本假设：

- 1) 假设本文所提出的空箱调运模型时在理想的海铁联运条件下建立的，即铁路箱到港口无需换装，可直接下水运输；
- 2) 仅考虑单一箱型即仅考虑 TEU 为单位的 20 英寸的标准集装箱；
- 3) 考虑多场站多港口的陆侧区域，空箱调运网络为多阶段、多节点系统，各节点的需求的分布函数均已知；
- 4) 考虑空重转换，上一期的重箱到下一期转化为空箱，作为空箱供给量，不考虑场站间港口间的任何重箱运输，各节点重箱到达量的分布均已知；
- 5) 租箱量无限制，所租空箱本期就可以到达，不考虑还箱；
- 6) 通过海运运输的空箱需要到下一期到达需求节点作为空箱供给，铁路调运的空箱当期就可到达；
- 7) 港口需求仅为班轮公司需求，仅可调运班轮公司在腹地场站的库存，不能调用班列公司库存；
- 8) 港口间不考虑航线影响，任意港口间均可互相到达；
- 9) 考虑多周期决策，且周期之间空箱状态可延续；
- 10) 集装箱运输市场波动平稳，处于相对稳定的状态，各供需节点间空箱调运的单位运输成本与单位租箱成本均保持不变；
- 11) 不考虑空箱的装卸成本，其包含在调运成本之内。

3.2. 参数与变量说明

根据模型需要设置如下表 1 所示所有符号与变量：

Table 1. Notations
表 1. 符号与变量说明表

变量类型	符号	符号说明
集合	T	计划周期, $t \in T$
	N	站点集合, 其中 N_1 为港口集合, N_2 为铁路集装箱场站集合 $i, j \in N_1, m, n \in N_2$
成本参数	C_{ij}	港口间的空箱调运成本
	C_{mi}	港口 $i \in N_1$ 与内陆铁路集装箱货运站 $m \in N_2$ 之间的空箱单位调运成本
	C_{mn}	场站 $m \in N_2$ 与场站 $n \in N_2$ 之间的空箱单位调运成本
	O_i	港口 $i \in N_1$ 的单位空箱堆存成本
	O_m	内陆集装箱货运站 $m \in N_2$ 的单位空箱堆存成本
	R_i	港口 $i \in N_1$ 的单位租箱成本
	R_m	场站 $m \in N_2$ 的单位租箱成本
	λ_{im}	当场站 $m \in N_2$ 为港口 $i \in N_1$ 服务时, 值为 1, 否则为 0
	θ_{mn}	当场站 $m \in N_2$ 与场站 $n \in N_2$ 之间可达时, 值为 1, 否则为 0
	其他参数	Q_i^0
Qp_m^0		班轮公司在内陆场站 $m \in N_2$ 的初始空箱库存
Qd_m^2		班列公司在内陆场站 $m \in N_2$ 的初始空箱库存
q_i^{max}		港口 $i \in N_1$ 的最大集装箱堆存量
q_m^1		班列公司在内陆场站 $m \in N_2$ 的最大集装箱堆存量
q_m^2		班轮公司在内陆场站 $m \in N_2$ 的最大集装箱堆存量
F_{ij}		t 周期内, 港口 $i, j \in N_1$ 之间的最大集装箱运输量
F_{im}		t 周期内, 港口 $i \in N_1$ 与集装箱货运站 $m \in N_2$ 之间的最大集装箱运输量
U_i^t		t 周期内, 港口 $i \in N_1$ 的到港重箱量
Kp_i^t		t 周期内, 港口 $i \in N_1$ 产生的空箱需求量, 即需要运出港口的重箱数量
需求参数	Kd_m^t	t 周期内, 班列公司运抵铁路集装箱货运站 $m \in N_2$ 的重箱量
	Kp_m^t	t 周期内, 班轮公司运抵铁路集装箱货运站 $m \in N_2$ 的重箱量
	D_m^t	t 周期内, 内陆场站 $m \in N_2$ 产生的出口空箱需求量
	α_i^t	t 周期内, 港口为余箱港时值为 1, 否则为 0
	β_m^t	t 周期内, 班列公司在场站余箱时值为 1, 否则为 0
	γ_m^t	t 周期内, 班轮公司在场站余箱时值为 1, 否则为 0
	x_{ij}^t	t 周期内, 港口 i 调运到港口 j 的空箱量 $i, j \in N_1$
	yd_{im}^t	t 周期内, 港口 $i \in N_1$ 调运到内陆集装箱货运站 m 的空箱量, $m \in N_2$
	yp_{mi}^t	t 周期内, 从内陆集装箱货运站 $m \in N_2$ 调运到港口 $i \in N_1$ 的空箱量, $m \in N_2$
	决策变量	y_m^t
z_{mn}^t		t 周期内, 场站 $m \in N_2$ 调运到场站 n 的空箱量, $n \in N_2$
Rp_i^t		t 周期内, 港口 i 租赁的空箱量 $i \in N_1$
Rd_m^t		t 周期内, 场站 m 租赁的空箱量 $m \in N_2$
状态变量		Sp_i^t
	Sp_m^t	t 周期末, 班轮公司在场站 m 的空箱库存量 $m \in N_2$ (非负整数)
	Sd_m^t	t 周期末, 班列公司在场站 m 的空箱库存量 $m \in N_2$ (非负整数)

3.3. 模型构建

本文目标函数，即总运营成本最小，包括港口间调运成本、港口的堆存成本、港口与场站的调运成本、堆存和租箱成本、场站间调运成本和场站租箱成本。

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} C_{ij} x_{ij}^t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_1} \sum_{m \in N_2} C_{mi} \lambda_{im} (y d_{im}^t + y p_{mi}^t) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{m \in N_2} \sum_{n \in N_2} \theta_{mn} z_{mn} C_{mn} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_2} S p_i^t O_i \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{m \in N_2} (S p_m^t + S d_m^t) O_m + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_1} R_i R p_i^t + \sum_{t \in T} \sum_{m \in N_2} R_m R d_m^t \end{aligned} \quad (1)$$

约束条件:

1) 港口期末库存迭代关系

$$S p_i^t = S p_i^{t-1} + U_i^{t-1} + \sum_{j \in N_1} x_{ji}^{t-1} + \sum_{m \in N_2} \lambda_{im} y p_{mi}^{t-1} + R p_i^t - \sum_{m \in N_2} \lambda_{im} y d_{im}^t - K p_i^t - \sum_{j \in N_1} x_{ij}^t, \forall i \in N_1, \forall t \in T \quad (2)$$

2) 场站期末库存迭代关系

$$\begin{aligned} S d_m^t + S p_m^t = & S p_m^{t-1} + S d_m^{t-1} + K p_m^{t-1} + K d_m^{t-1} + \sum_{i \in N_2} \lambda_{im} y d_{im}^{t-1} + \sum_{n \in N_2} \theta_{mn} z_{nm}^t \\ & - D_m^t - \sum_{i \in N_1} \lambda_{im} y p_{im}^t - \sum_{n \in N_2} \theta_{mn} z_{mn}^t, \forall m \in N_2, \forall t \in T \end{aligned} \quad (3)$$

班轮公司在场站库存迭代关系:

$$S p_m^t = S p_m^{t-1} + K p_m^{t-1} - \sum_{i \in N_1} \lambda_{im} y p_{im}^t - y_m^t, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (4)$$

班列公司在场站库存迭代关系:

$$S d_m^t = S d_m^{t-1} + K d_m^{t-1} + \sum_{n \in N_2} \theta_{mn} z_{nm}^t + \sum_{i \in N_2} \lambda_{im} y d_{im}^{t-1} + y_m^t - D_m^t - \sum_{n \in N_2} \theta_{mn} z_{mn}^t, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (5)$$

3) 港口与场站间的空箱调运量平衡

当港口或场站余箱时，调出量要小于净余箱量:

$$\alpha_i^t \left(\sum_{j \in N_1} x_{ij}^t + \sum_{m \in N_2} \lambda_{im} y d_{im}^t \right) \leq S p_i^{t-1} + U_i^{t-1} - K p_i^t, \forall i \in N_1, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N_2} \beta_n^t \mu_{mn} z_{mn}^t \leq S d_m^{t-1} + K d_m^{t-1} - D_m^t, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (7)$$

当港口或场站缺箱时，调入量要大于净缺箱量:

$$\sum_{j \in N_1} \alpha_j^{t-1} x_{ji}^{t-1} + \sum_{m \in N_2} (1 - \alpha_i^t) \lambda_{im} y p_{mi}^{t-1} + (1 - \alpha_i^t) R p_i^t \geq -(S p_i^{t-1} + U_i^{t-1} - K p_i^t), \forall i \in N_1, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{n \in N_2} \beta_n^t \theta_{mn} z_{mn}^t + \sum_{i \in N_1} \alpha_i^{t-1} \lambda_{im} y d_{im}^{t-1} + (1 - \beta_m^t) (y_m^t + R d_m^t) \geq -(S d_m^{t-1} + K d_m^{t-1} - D_m^t), \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (9)$$

4) 租箱量约束

$$(1 - \alpha_i^t) R p_i^t \leq -(S p_i^{t-1} + U_i^{t-1} - K p_i^t), \forall i \in N_1, \forall t \in T \quad (10)$$

$$(1 - \beta_m^t) R d_m^t \leq -(S d_m^{t-1} + K d_m^{t-1} - D_m^t), \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (11)$$

5) 容量约束

场站堆存约束:

$$0 \leq Sd_m^t \leq q_m^1 \quad (12)$$

$$0 \leq Sp_m^t \leq q_m^2 \quad (13)$$

港口堆存约束:

$$0 \leq Sp_i^t \leq q_i^{\max}, \forall i \in N_1, \forall t \in T \quad (14)$$

6) 运输容量约束

$$yd_{im}^t \lambda_{im} \leq F_{im}, \forall i \in N_1, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (15)$$

$$yp_{mi}^t \lambda_{im} \leq F_{im}, \forall i \in N_1, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (16)$$

$$x_{ij}^t \leq F_{ij}, \forall i, j \in N_1, \forall t \in T \quad (17)$$

7) 班轮公司场站库存调出量小于供给量

$$y_m^t + \sum_{i \in N_1} \lambda_{im} yp_{mi}^t \leq Sp_m^{t-1} + Kp_m^{t-1}, \forall m \in N_2, \forall t \in T \quad (18)$$

8) 决策变量的非负约束

$$x_{ij}^t, y_m^t, yp_{mi}^t, yd_m^t, Rp_i^t, z_{mn}^t \geq 0, \text{且为整数} \quad (19)$$

4. 数值实验

4.1. 算例选取

西部陆海新通道作为国内较为成熟的海铁联运的运输通道, 其具有较为成熟的港口陆侧铁路运输网络, 所运行海铁联运班列, 将内陆货物运输至北部湾(钦州港、北海港、防城港)、湛江港和洋浦港, 出海联通国际海运网络。港口群和内陆城市节点间均可实现铁路运输, 这为本研究提供了先决条件。本文选取西部陆海新通道所连接的北部湾出海口的港口群以及其经济腹地为例, 假设多式联运经营人负责运营西部陆海新通道的某条海铁联运线路, 此海铁联运线路由一个班轮公司和一个班列公司组成, 多式联运经营人与班轮公司和班列公司均已签订代理合同, 由此组成的多式联运内陆运输系统。选取节点如表 2 所示。

Table 2. Select port and hinterland station nodes

表 2. 选取港口及腹地场站节点

节点类型	名称
港口	北海港(1)、钦州港(2)、防城港(3)
场站	南宁(4)、柳州(5)、来宾(6)、桂林(7)、玉林(8)

将算例中的周期数设定为 5, 每周期长度为 7 天。内陆所有运输均为铁路运输, 铁路运价为 1.8 元/TEU·km, 海运运价为 0.8 元/TEU·km。海港的租箱成本为 4000 元/TEU·天, 堆存成本为 10 元/TEU·天, 内陆场站的空箱堆存成本为 5 元/TEU·天。对于各节点每周期的需求量和供给量均的分布均已知, 假设均服从正态分布, 具体分布如表 3 所示。对于各节点的初始库存, 参考大量文献中, 学者多采取 0 初始库存的设置, 但考虑到实际操作中, 本文设置港口存在一定初始库存, 班列在场站存在一定初始库存, 具体初始库存量如表 4 所示。

Table 3. Distribution of empty container demand and supply at each node under confirmed demand
表 3. 需求确定情况下各节点空箱需求和供给量分布

	空箱需求	空箱供给
北海港	(920,50 ²)	(1350,50 ²)
钦州港	(5000,50 ²)	(4250,100 ²)
防城港	(1050,50 ²)	(1200,50 ²)
南宁	(500,20 ²)	(500,20 ²)
柳州	(300,20 ²)	(300,20 ²)
来宾	(300,20 ²)	(300,20 ²)
桂林	(500,20 ²)	(500,20 ²)
玉林	(300,20 ²)	(300,20 ²)

Table 4. Initial empty container inventory at each node
表 4. 各节点初始的空箱库存量

数量(TEU)	北海	钦州	防城	南宁	柳州	来宾	桂林	玉林
空箱初始库存	1890	4020	1590	222	154	247	344	173

注：设置的场站初始库存为班列公司库存，认为班轮公司在各场站节点无初始库存。

4.2. 算例求解结果

本文通过采用 CPLEX 12.10.0 对模型进行求解，所有运算均在 Windows11.0 操作系统的 CPU 处理器下进行。针对所建立的海铁协同空箱调运模型和算例数据给出两种情形，情形 1：考虑港口与场站之间的调运，且认为港口可以覆盖所有场站，即 λ_m 的值均为 1。情形 2：不考虑港口与场站之间的调运，即 λ_m 的值均为 0。两种情形下的需求量与供给量均一致。求解的各项成本结果如下表所示。

Table 5. Result of example solution
表 5. 算例求解结果

成本/万元	总成本	租箱成本	港间调运成本	港站间调运成本	场站间调运成本	堆存成本
情形 1	794.0	508.4	9.4	234.3	2.2	39.6
情形 2	1609.5	1511.2	20.8	0	1.7	75.8
变化量	815.5	1002.8	11.4	-234.3	-0.5	36.2

从表 5 中可以看出，考虑海铁协同调运的情形 1 的空箱调运总成本低于不考虑海铁协同的情形 2 的调运总成本。

如图 2 所示，情形 1 下除港口和场站间的调运成本，包括租箱在内的所有其他调运成本均低于情形 2 下的相应成本。分析原因如下：当对于整个港口群陆侧的空箱调运系统不考虑港站间互相调运的情况下，虽然减少了港站间调运的成本，但是对于缺箱节点无法获得足够的调运量就需要通过租箱来满足空箱需求，而租箱成本远高于调运成本，随着租箱量的增加，租箱成本增大。而租箱量的增加、调运量的减少也导致了堆存量的增加，从而导致库存成本也增加，最终导致整个调运的总成本增大。综上所述，考虑港站间的海铁协同空箱调运能够为节省港口群陆侧系统的空箱调运成本。

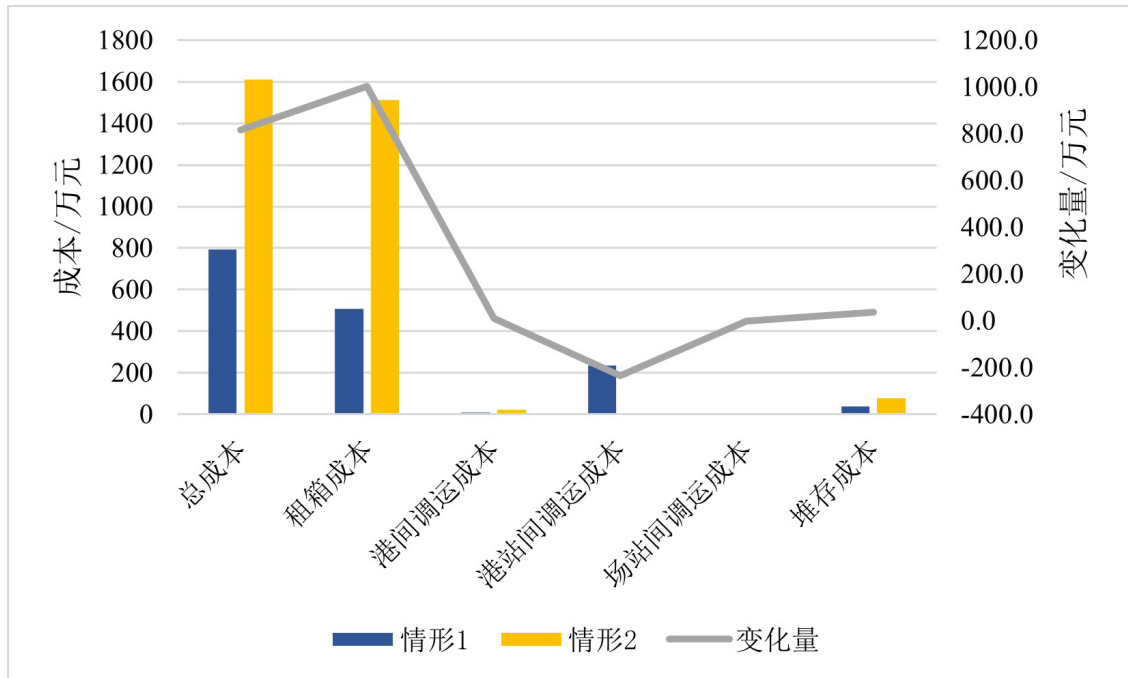


Figure 2. Result of example solution
图 2. 算例求解结果示意图

4.3. 灵敏度分析

1) 需求变化对各项成本的影响

算例考虑的是出口导向型的港口群及腹地，算例数据中需求与供给的关系是需求大于供给，因此考虑不同需求水平下模型求解的各项成本的变化。图 3 为港口需求变化对各成本的影响；图 4 为场站需求变化对各成本的影响，其中 0 对应算例数据中初始地随机生成量的计算结果。

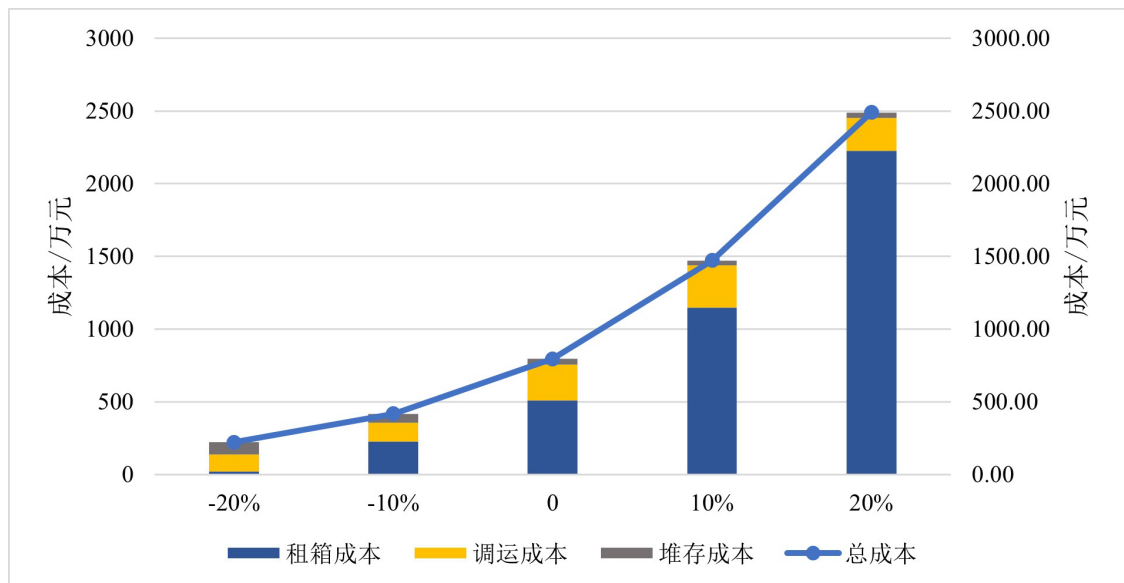


Figure 3. Various costs under changes in port demand
图 3. 港口需求变化下各项成本

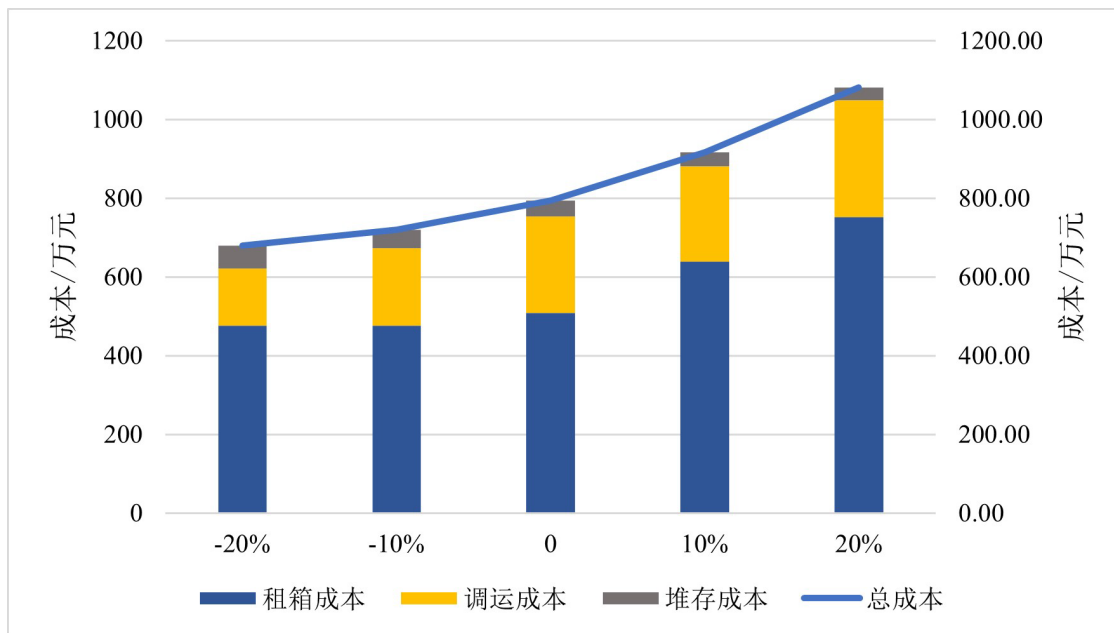


Figure 4. Various costs under changes in station demand

图 4. 场站需求变化下各项成本

总的来看,随着需求量的不断增加,总成本增加,租箱成本的占比越来越大。但随着需求的不断增加,调运成本呈现出先增加再减少的情况,主要是因为当需求不断增加,供给小于需求时,供不应求,余箱节点越来越少,余箱量越来越少,导致调运成本出现需求增加调运成本减少的情况。而且对比港口需求变化和场站需求变化对成本的影响发现,港口需求的变化对总体成本的变化幅度影响更大。当港口需求减少时,整体成本都降低了,而港口需求增加 20%所增加的成本比场站需求同样增加 20%而引起的成本增加要多的多。

2) 单位租箱成本变化对各项成本的影响

在空箱调运问题中当节点缺箱时,通常采用租箱和调箱两种方式来满足空箱需求。因此,租箱成本是总运营成本的关键组成,单位租箱成本会影响租箱成本,因此研究单位租箱成本的变化对调运成本的影响非常关键。考虑两种情况下:第一是供小于需;第二是供大于需;在两种供求关系下单位租箱成本如何影响总的运营成本和各项成本。

图 5 给出了总供给小于总需求下的单位租箱成本变动下的各项成本变化情况。在单位租箱成本变化幅度在-60%~100%之间时,调运成本不变,说明此时调运量不变,说明此时调运量未发生变化,在该范围内单位租箱成本的变化不会影响其调运成本。在单位租箱成本变化在-20%降低至-60%时,调运成本降低,说明此时调运量减少,租箱量增加,这表明了单位租箱成本的降低会使得陆侧调运系统更倾向于通过租箱来满足空箱需求。而整体来看,堆存成本均保持稳定,说明由于堆场库存限制导致库存成本变化不大,同时由于单位库存成本较低导致库存成本占比较小。图 6 给出了总供给大于总需求下的单位租箱成本变动下的各项成本变化。在单位租箱成本变化在-60%到 100%时,调运成本和堆存成本均未发生明显变化,说明在供大于求时,调运量与堆存量变化不大,说明此时供应量足以满足空箱需求,单位租箱成本不会影响整个系统优化的情况。租箱成本均会随着单位租箱成本的变化而变化,单位租箱成本增加,租箱成本增加。

3) 单位调运成本变化对各项成本的影响

图 7 给出了单位调运成本变化下的各项成本变化。在供给小于需求时,在单位调运成本变化在-60%

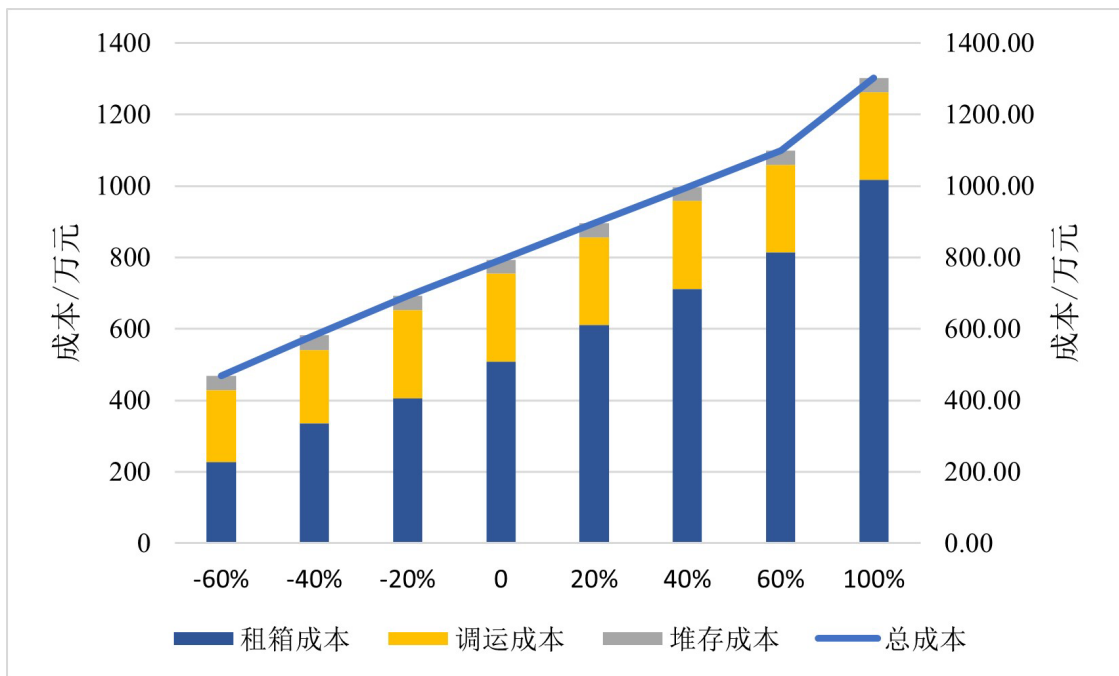


Figure 5. The cost of each item under the change of the cost of the supply less than the demand
图 5. 供小于求租箱成本变化下各项成本

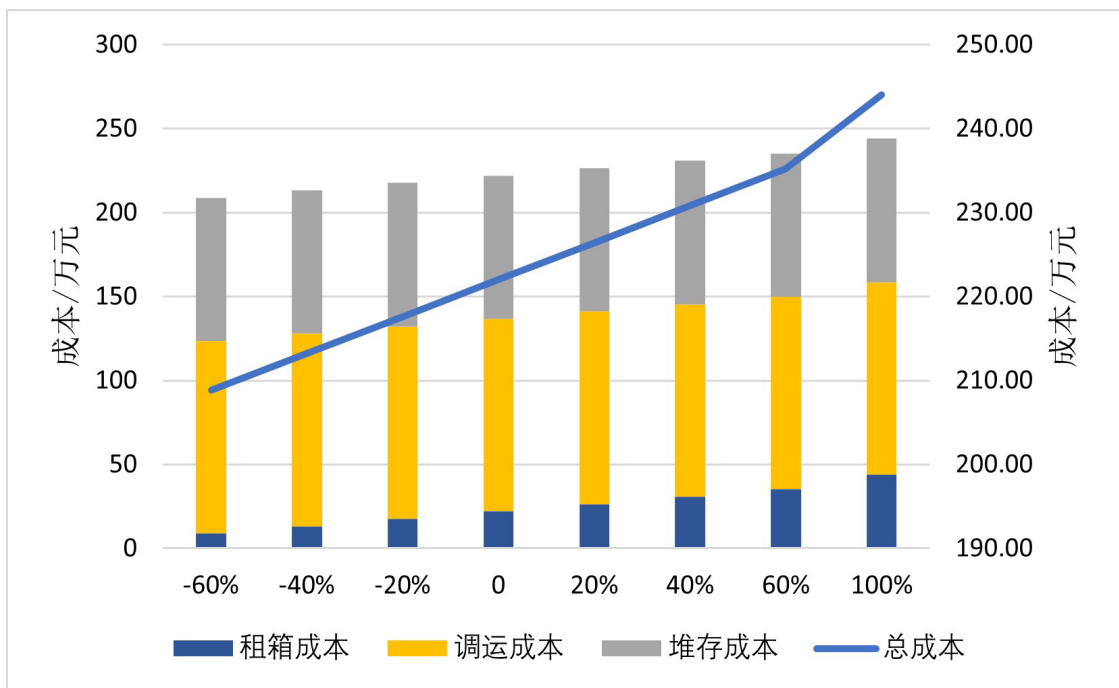


Figure 6. Various costs under the change of rental container cost due to oversupply
图 6. 供大于求租箱成本变化下各项成本

到 20%之间时, 调运成本增加, 租箱成本不变, 说明在这个区间变化时, 租箱量不变, 调运量也不变, 单位调运成本对系统优化决策并不产生影响。但当单位调运成本由 20%提升至 40%时, 租箱成本增加, 调运成本降低, 说明调运成本增加到此水平时, 系统优化方向更倾向于通过增加租箱量来满足空箱需求。

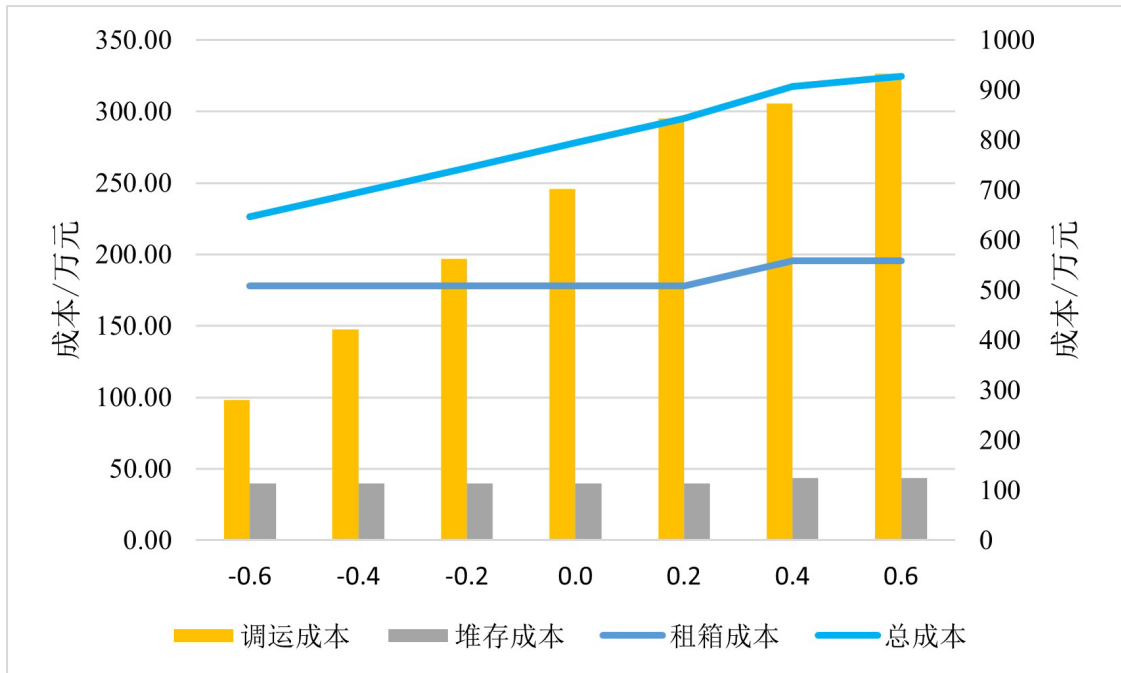


Figure 7. Various costs under the change of unit transportation cost
图 7. 单位调运成本变化下各项成本

4) 单位堆存成本变化对各项成本的影响

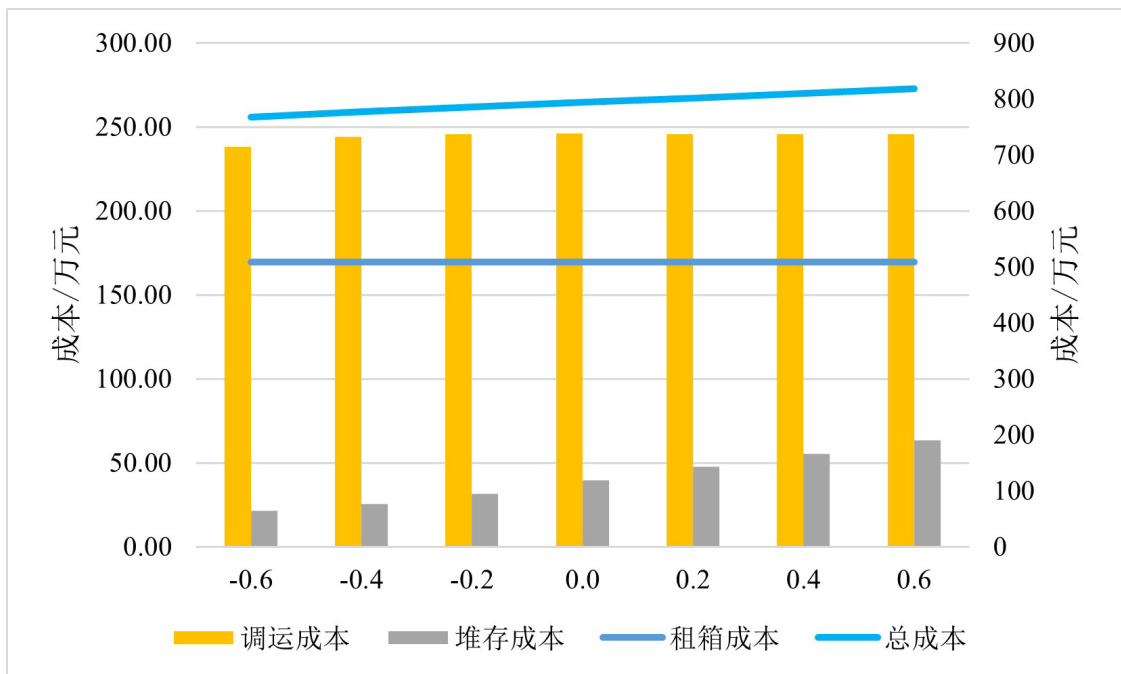


Figure 8. Each cost under the change of unit stockpile cost
图 8. 单位堆存成本变化下的各项成本

图 8 给出了单位堆存成本变化下的各项成本。变化幅度在-60%到 60%，调运成本和租箱成本几乎保持不变，堆存成本随着单位堆存成本的增加而增加，说明在此范围变化，对系统优化决策不产生任何影

响。

5. 结论

本文针对出口导向型国家的港口群及其腹地地区的空箱调运问题，研究了一个由班轮公司与班列公司组成的海铁联运陆侧空箱调运系统，考虑多周期和空箱共享，通过海铁协同的方式，建立了港口群陆侧空箱调运的多周期混合整数非线性规划模型，结合实际的港口群与腹地关系的数据，利用 CPLEX 求解，求解结果对比了考虑海铁协同的情况和非海铁协同的情况，并进行了灵敏度分析得到以下结论：

1) 算例结果显示，在考虑海铁协同的情况下，系统调运总成本更低，验证了港口群陆侧通过海铁协作的空箱调运可以减少总的调运成本。

2) 通过灵敏度分析，分析了众多影响因素变化对各项成本的影响，得到以下结论：

首先，需求变化对空箱调运成本影响最大，港口需求变化较于场站需求的变化对各项成本的影响更大；其次，单位租箱成本变化在空箱供给小于空箱需求时对各项成本的影响较大，当空箱供给大于空箱需求时，单位租箱成本变化除对租箱成本产生影响外，对其他成本并无太大影响；最后单位堆存成本变化对除堆存成本外的所有成本均不产生影响，不会对优化方向产生影响。

参考文献

- [1] Crainic, T.G., Gendreau, M. and Dejax, P. (1993) Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. *Operations Research*, **41**, 102-126. <https://doi.org/10.1287/opre.41.1.102>
- [2] Wang, Q., Zheng, J. and Lu, B. (2024) Liner Shipping Hub Location and Empty Container Repositioning: Use of Foldable Containers and Container Leasing. *Expert Systems with Applications*, **237**, Article ID: 121592. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121592>
- [3] 计明军, 闫妍, 祝慧灵. 海铁联运铁路集装箱定价与运营优化[J]. 中国管理科学, 2018, 26(7): 159-169.
- [4] Song, D. and Dong, J. (2012) Cargo Routing and Empty Container Repositioning in Multiple Shipping Service Routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**, 1556-1575. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>
- [5] Liang, J., Ma, Z., Wang, S., Liu, H. and Tan, Z. (2024) Dynamic Container Slot Allocation with Empty Container Repositioning under Stochastic Demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **187**, Article ID: 103603. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103603>
- [6] 张高鹏. 箱种及车种代用下铁路集装箱空箱调配研究[J]. 交通科技与经济, 2015, 17(5): 95-98.
- [7] 石红国, 高明瑶. 带时间窗约束的集装箱空箱调运随机机会约束模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(2): 87-92.
- [8] 段刚, 陈莉, 李引珍, 等. 基于货物等级的空重集装箱运输优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(5): 140-147.
- [9] 师志鸿, 李友东, 王瑞永, 等. 基于鲁棒软时间窗和箱种代用的铁路集装箱空箱调运优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(5): 22-30.
- [10] Chen, K., Lu, Q., Xin, X., Yang, Z., Zhu, L. and Xu, Q. (2022) Optimization of Empty Container Allocation for Inland Freight Stations Considering Stochastic Demand. *Ocean & Coastal Management*, **230**, Article ID: 106366. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106366>
- [11] Kuzmicz, K.A. and Pesch, E. (2019) Approaches to Empty Container Repositioning Problems in the Context of Eurasian Intermodal Transportation. *Omega*, **85**, 194-213. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.004>
- [12] 詹斌, 李宇涵, 冯国帅, 等. 无水港参与下的区域海港群空箱调运优化[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 86-92.
- [13] Xie, Y., Liang, X., Ma, L. and Yan, H. (2017) Empty Container Management and Coordination in Intermodal Transport. *European Journal of Operational Research*, **257**, 223-232. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.053>
- [14] 徐华锋, 王育红, 洪钺. 共享模式下港口群陆侧海铁协同空箱调运策略研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(3): 81-88.