

基于网络货运平台的中欧班列货源组织优化

孙君静, 丁浩楠, 邢惠尧, 武广娜, 赵鲁华*

山东科技大学交通学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年1月26日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年3月27日

摘要

本文提出了基于网络货运平台的中欧班列货运组织形式, 构建了以总运输成本、总时间最小化为目标的双目标优化模型。基于网络货运平台的车货匹配模型选择车源, 基于NSGA-II算法求解模型。通过算例分析, 对货源地城市的货运订单进行集聚优化, 确定了货源组织方案及集聚地城市, 验证了模型和算法的有效性, 可有效提升中欧班列的货源集聚效率。

关键词

中欧班列, 网络货运, 运输组织, 货源组织优化

Optimization on Source Organization for the China-Europe Express Based on Network Freight Platform

Junjing Sun, Haonan Ding, Huiyao Xing, Guangna Wu, Luhua Zhao*

College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jan. 26th, 2024; accepted: Mar. 18th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

This paper put forward the source organization form of China-Europe Express based on the network freight platform, and constructed a two-objective optimization model with the minimization of total transportation cost and total time as the objective. Vehicle-cargo matching model based on network freight platform selected vehicle source, and solved the model based on NSGA-II algorithm. Through the analysis of examples, the agglomeration optimization of orders in the source city was carried out, the source organization scheme and the agglomeration city were determined, and the effectiveness of the model and algorithm was verified, which could effectively improve the source

*通讯作者。

organization efficiency of China-Europe Express.

Keywords

The China-Europe Express, Network Freight, Transportation Organization, Source Organization Optimization

Copyright © 2024 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

目前，中欧班列已取得了巨大效益。但在目前国际形势下，很多因素限制了其发展，其中货源组织混乱、匹配效率差成为制约中欧班列发展的主要原因之一。中欧班列运输路线长、涉及部门环节多，各地间的无序竞争导致货源组织混乱；信息共享程度低等因素导致货源与班列匹配效率差。另外，物流网络布局差、空箱运输量大等因素导致中欧班列的服务质量降低，运输成本提高。本文提出基于网络货运平台的资源整合优势，以总运输成本为优化目标，对中欧班列货源集聚进行优化研究，以提高中欧班列货源集聚效率及信息化。

2. 文献综述

针对中欧班列的运输组织模式，已有学者做了相关研究。如赵娟等[1]构造了考虑集结时间的直达与中转运输优化模型。魏玉光等[2]提出了基于枢纽集结的中欧班列运输组织模式，对路径选择、枢纽站选址等问题进行优化。于雪娇[3]基于集并运输组织分析，设计了适应不同场景的“多点集并”、“单点集并”等集并运输组织模式。Ma 等[4]、邓飞等[5]、杨佑钊[6]、Cheng 等[7]、刘蒙蒙等[8]构建了枢纽选址模型，划分枢纽等级，确定集散中心。王浩然[9]从多个角度综合分析了公铁联运过程中的不确定因素，采用三角模糊变量来表达集装箱运输的不确定时间和枢纽站点的中转时间。康禄[10]建立了考虑碳排放的公铁联运路径优化模型和运输方式选择优化模型。

网络货运经营者借助数据资源整合优势对承运人及货源进行优化整合，借助大数据、互联网等技术实现运输行业升级。针对网络货运平台的调度能力与车货匹配问题，杨晓蕾[11]研究了无车承运人平台的运营模式以及车货双边供需匹配与运力调度的决策方式。王小文[12]构建了带时间窗约束的混合装卸货地的、多目标平台类无车承运人运力动态调度优化模型。吴国游[13]采用双层规划模型求解网络货运平台运力资源调度优化问题。常连玉[14]提出了搭建无车承运人信息平台，建立了带有机会约束条件的运力资源组织优化模型。针对中欧班列信息共享程度低、各环节衔接不畅等问题，已有学者提出引入信息、网络等技术来优化货运组织问题。网络货运模式在货运行业提质增效中发挥重要作用，目前已有中欧班列运营企业尝试借助网络货运优势促进技术创新，提升中欧班列运营效率。韩煜东等[15]引入了网络货运 + 公铁联运新模式。

综上所述，针对基于网络货运平台的中欧班列货源组织方面的研究还很欠缺。根据目前研究不足及实践发展需求，针对班列信息化水平低、货源组织优化目标单一等问题，本文综合考虑成本、时间、距离、枢纽运营能力、班列服务时间窗等因素，构建了基于网络货运模式的多目标货源集聚优化模型，以数据、技术赋能中欧班列集约化运营，提升货源集聚效率及低碳化水平。

3. 基于网络货运平台的中欧班列运输组织方案

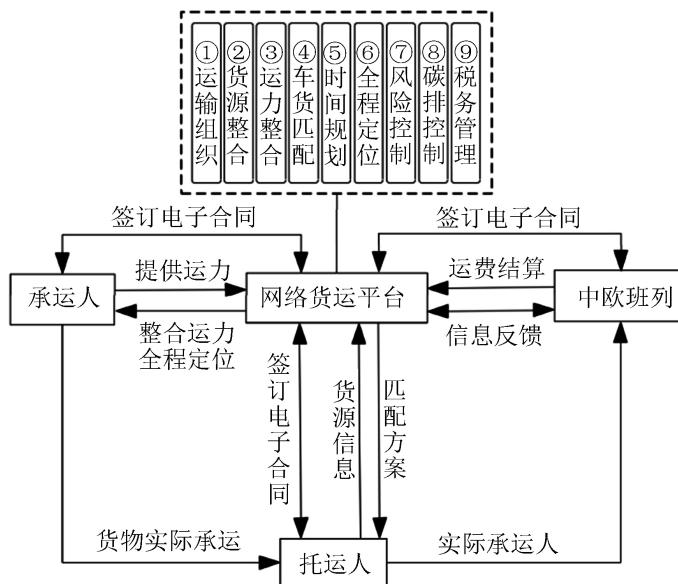


Figure 1. Operation mode of China-Europe Express based on network freight platform

图 1. 基于网络货运平台的中欧班列运营模式

本文提出如图 1 所示的基于网络货运平台的中欧班列运营模式。托运人、承运人、中欧班列与网络货运平台签订合同后，平台根据距离、时间、货物属性、车辆属性等指标匹配车辆并优化取送路线。最终，平台进行运费结算，凭借网络货运的税收政策优势，为托运人开具 9% 运输服务费。

如表 1 所示，收货地 X 需要 I 类货物，但货源地 A 的集装箱货量不能满足开行需求。通过网络货运平台整合可匹配的货源信息，将货源地 B 的 I 类货源与 A 地的 I 类货源经公路运输到集聚地 D，与 D 处的 I 类货源经班列在规定时间内运输到边境口岸 E。收货地 Y 需要 II 类货物，经网络货运平台搜索匹配，货源地 C 的集装箱货量可以满足开行需求。

Table 1. Examples of China-Europe Express transportation organization schemes based on network freight platform
表 1. 基于网络货运模式的中欧班列运输组织方案举例

货类	货源地	运输方式	集聚地	服务时间窗	运输方式	边境口岸	运输方式	收货地
I	A B	公路	D	$[t_{e_1}, t_{e_1}]$	铁路	E	班列	X
II	C	公路	-	$[t_{e_2}, t_{e_2}]$	-	F	班列	Y

4. 优化模型及算法设计

4.1. 问题描述

中欧班列采用集装箱运输，向网络货运平台提出若干集装箱货运申请。基于网络货运平台对取送货时间进行约束，建立以车货匹配度最大、总运输成本最优模型，并设计算法求解，依据求解结果确定方案。

4.2. 定义变量

基于本章构建的模型，涉及的参数、变量等符号的表示及说明如表 2 所示。

Table 2. Symbols and descriptions**表 2. 符号及说明**

符号	含义	符号	含义
K	车源地集合, $k=1 \dots K$	$[t_{e_f}, t_{l_f}]$	班列 f 的服务时间窗
I	货源地集合, $i=1 \dots I$	R	网络货运增值税税负
F	集聚地集合, $f=1 \dots F$	L	车货匹配度
J	边境口岸集合, $j=1 \dots J$	t_f	车辆到货源集聚地时间
M	收货地集合	λ_f	货源集聚地 F 的中转时间
A	运输方式, $a, b \in A = 1, 2$, 分别为公路, 班列	d_{ij}^a	节点 i, j 间第 a 种运输方式的运输距离, $i, j \in H$
H	节点集合, $K \cup I \cup F \cup J \in H$	θ	硬性评价指标数量
T	总运输时间	μ	弹性评价指标数量
T_i^k	第 k 车辆从 i 出发的时刻	p^a	各运输方式单位运输成本
α_f	集聚地 f 最大运营能力	p^{ab}	公转铁的单位成本
q_i	货源地 i 的货量	p_4	编组成本
q_f	货源集聚地 f 的货量	p_5	仓储成本
d_f	节点 f 处平均取货距离	p_6	延误运到惩罚成本
x_{ij}^a	节点 i, j 间采用运输方式 a 时为 1, 否则为 0, $i, j \in H$	β^k	车源 k 的集装箱类型, 20 英尺、40 英尺
y_i	$q_f \leq \alpha$ 为 1, 反之 0	y_f^{ab}	运输方式改变为 1, 否则为 0
γ	车辆出发时间满足为 1, 反之 0	t_f^k	车辆 k 到达 f 不在时间窗内 $[t_e, t_l]$ 内为 1, 否则为 0
q^β	集装箱类型匹配为 1, 反之 0	y_k	车辆 k 未被使用为 1, 反之 0

4.3. 模型构建

网络货运模式下, 货源信息和车源信息存储在网络货运平台上, 网络货运经营者可在较短时间内快速精准匹配车货资源, 为托运人快速找到合适、充足的运力资源, 为承运人减少搜寻成本, 提高车辆有效利用率。

因此, 利用网络货运平台进行货源集聚优化, 首先应满足车货匹配度最优, 进而减少货源搜寻成本及等待时间, 降低空载率。网络货运经营者通过网络货运平台, 综合考虑与货源地距离最优、符合集装箱型要求、当前空载等条件, 选择车货匹配度 L 最大的车源作为实际承运人, 车货匹配模型公式为:

$$L = y_k + q^\beta + \gamma + \dots \quad (1)$$

本文考虑运输成本 W_1 、时间惩罚成本 W_2 最优。运输成本 W_1 与时间惩罚成本 W_2 称为总运输成本 W 。通过集装箱运输量、运输方式、运输时间、运输距离、公路和铁路运输成本、装卸和编组费用来定义各节点之间的服务和航程。

$$W = W_1 + W_2 \quad (2)$$

1) 运输成本 W_1

运输成本包括货源集聚成本 w_1 、班列运输成本 w_2 和中转成本 w_3 , 空箱运输成本是重箱运输成本的 40% [16]。

$$W_1 = w_1 + w_2 + w_3 \quad (3)$$

① 货源集聚成本 w_1 : 由于铁路运输枢纽的位置特性, 货物由货源地集聚运输到中欧班列货源集聚地, 需要通过公路运输将货物运输到铁路运输枢纽。同时, 考虑开行中欧班列需要大量运力资源和货源, 因此,

车源空载行驶至货源地成本和公路运输货物到铁路枢纽的运输成本不可忽略。运输成本则主要包括由车源地到货源地的公路空箱运输成本、公路重箱运输成本以及网络货运模式下公路运输的综合税负。

$$\begin{aligned} w_1 = & \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} 0.4 q_i p^a d_{ki}^\alpha q^\beta x_{ki}^a + \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{a \in A} p^a d_{if}^\alpha x_{if}^a \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} \sum_{a \in A} 0.4 q_f p^a d_{kf}^\alpha q^\beta x_{kf}^a + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} p^a d_f + R \end{aligned} \quad (4)$$

② 班列成本 w_2 : 以集装箱为单位的班列运输成本。

$$\begin{aligned} w_2 = & \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{j \in J} \sum_{a, b \in A} (q_i + q_f) (440 + 3.185 d_{jf}^a) y_f^{ab} x_{jf}^a \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} (q_i + q_f) (440 + 3.185 d_{jm}^a) x_{jm}^a \end{aligned} \quad (5)$$

③ 中转成本 w_3 : 货物在中转地进行装卸、编组、转关产生费用。

$$w_3 = \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{a, b \in A} (p_3 + p_4) (q_i + q_f) y_f^{ab} + \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} (p_4 + p_7) (q_i + q_f) \quad (6)$$

2) 时间惩罚成本 W_2

时间惩罚包括提前到达节点的等待时间惩罚和延误运到的时间惩罚，分别体现在仓储费用和惩罚费用。

$$W_2 = \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} q_i \left[p_5 \max(t_{ef} - t_f, 0) + p_6 \max(t_f - t_{lf}, 0) \right] y_f^{ab} \quad (7)$$

约束条件:

$$\sum_{a \in A} x_{ij}^a \leq 1; \quad \forall i, j \in H \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} x_{ij}^a = 1; \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$x_{if}^a + x_{jf}^b \leq 2 y_f^{ab} \quad \forall a, b \in A \quad \forall i, f, j \in H \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} q_i x_{if}^a \leq \alpha_e, \quad \forall e, f \in F, \forall a \in A \quad (11)$$

$$x_{ij}^a \in \{0, 1\}; \quad \forall a \in A \quad \forall i, j \in H \quad (12)$$

式(8)表示节点间只能选择一种运输方式；式(9)表示需完成所有货源地 i 的运输任务；式(10)表示中转时运输方式的连续性；式(11)表示集装箱货量不超过集聚地枢纽 f 的运营能力；式(12)表示决策变量取值为 0、1。

4.4. 模型求解算法

1) 基于网络货运平台车货匹配

考虑车源条件和货源需求，实现全局资源的最优分配，如图 2 所示。

首先，通过网络货运平台设定硬性评价指标：车型、当前是否在途，初步筛选满足硬性指标的运力。其次，设定其他弹性评价指标，例如取货时间、距离、线路熟悉程度、驾龄、等评价指标，从而选取最优运力作为实际承运人。

车货匹配评价指标的权重可以根据交易双方的特点，采用层次分析法评定得到。货源方与车源方通过网络货运平台设定评价指标进行匹配，对于所有硬性指标均应满足等于 1，其他弹性指标应该满足大于 0 小于等于 1 的条件，如果不满足，则在匹配过程中无法匹配。

为符合实际情况，增强车源的适用性与随机性，具体生成过程如图 3 所示。

- ① 以货源地为中心，获取每 1 公里内的车源。② 判断每辆货车是否在途，若车辆不在途，则 $L+1$ 。
- ③ 判断是否满足集装箱类型要求，若货车满足所需集装箱类型，则 $L+1$ 。④ 判断是否满足出发时间要求，若满足，则 $L+1$ 。⑤ 若车辆同时满足② ③ ④，则保留该车辆。⑥ 询问承运人是否接单，若承运人同意接单，则符合条件车辆数 $N = n + 1$ 。⑦ 若承运人不同意接单，则返回①搜索下一距离范围内的车源。⑧ 若车辆不满足② ③ ④任意一个评价指标，且搜寻车辆未能达到车辆需求量 m ，则继续搜寻下一距离范围内的车辆，判断是否满足② ③ ④ ⑥。⑨ 搜寻车辆数量达到 m 时，终止计算，输出车辆距货源地的距离和出发时间。⑩ 循环上述步骤，可以获得符合匹配指标的车辆集。

2) 基于 NSGA-II 算法求解货源集聚模型

多目标优化问题数学表达式如下：

$$\min F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k$$

式中： $F(x)$ 是 m 个 $f_i(x)$ 函数的集合，对应货源集聚模型，总运输费用和总运输时间可理解成 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 两个优化目标。 $g_i(x) \leq 0$ 和 $h_j(x) = 0$ 确定解的可行域。

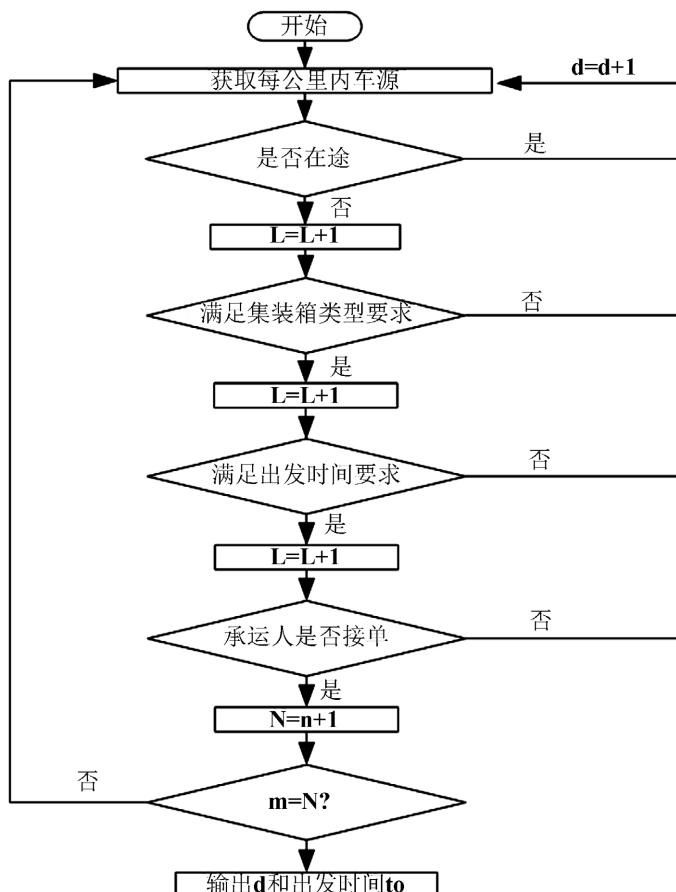


Figure 2. Matching process of vehicle and cargo
图 2. 车货匹配流程

算法的基本思路是，基于帕累托排序的适应机制，利用遗传算法的集体搜索。首先初始化随机产生种群，将初始种群进行快速非支配排序，自此开始经过遗传算法的多次选择、交叉和变异，持续迭代进化多次，不断提高个体适应度，最后让求解问题逐渐向其帕累托最优解集逼近，如图 3 所示。

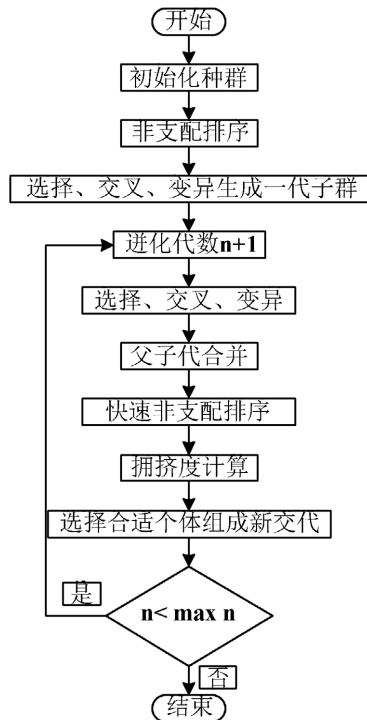


Figure 3. Flowchart of NSGA-II Algorithm
图 3. NSGA-II 算法流程

5. 案例分析

5.1. 案例介绍

本文选取阿拉山口为边境口岸，西安国际港站、成都城厢站、重庆团结村为货源集聚地，网络货运试点城市济南、昆明、合肥为货源地，如图 4 所示。运输数据见表 3~5。

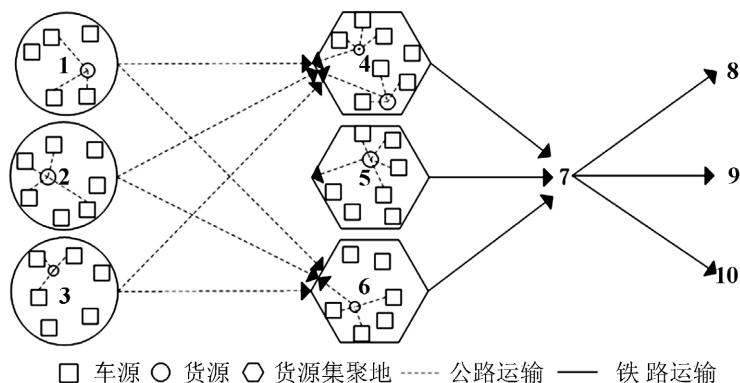


Figure 4. Source organization transportation network of China-Europe Express based on network freight platform

图 4. 基于网络货运平台的中欧班列货源组织运输网络

Table 3. Road transportation data
表 3. 公路运输数据

运输弧	运输距离(km)	运输容量(TEU)	运输时间(天)	货源供应量(TEU)
1→4	893	150	0.465	
1→5	1547	245	0.806	46
1→6	1671	200	0.870	
2→4	1759	190	0.916	
2→5	835	230	0.435	23
2→6	815	145	0.424	
3→4	927	160	0.483	
3→5	1236	205	0.644	104
3→6	1528	170	0.796	
d_4		600		435
d_5	458	300	0.239	360
d_6		400		362

Table 4. Railway transportation data
表 4. 铁路运输数据

运输弧	运输距离(km)	运输容量(TEU)	运输时间(天)
4→7	3045	600	4.229
5→7	3812	400	5.294
6→7	3512	400	4.878
7→8	6730	1500	9.347
7→9	6011	1500	8.349
7→10	7150	1500	9.931

注：数据来源于中国铁路 95306 网。

Table 5. Variable data
表 5. 变量数据

节点	服务时间窗	类别	单位成本
4	[1.11, 2.41]	p^1	8.08 元/TEU· km
5	[1.5, 2.9]	p^2	440 + 3.185 × 运输距离
6	[1.3, 2.8]	p_3	150 元/TEU
7	[6, 8.5]	p_4	200 元/TEU
8	[15, 19]	p_5	75 元/TEU· h
9	[14, 18]	p_6	120 元/TEU· h
10	[15, 19]	p_7	1470 元/TEU

5.2. 案例求解

根据车货匹配模型，以 1 公里为单位、车辆是否在途、集装箱是否满足 20 英尺集装箱、是否满足出发时间等条件搜索车辆。节点 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 分别需要 46、23、104、430、360、362 辆配备 20

英尺空载集装箱的车辆。利用货源集聚优化模型及算法，使用 python 进行编程求解。

利用车货匹配模型得到每个节点在每 1 公里范围内的车源距离生成图和车源数量生成图，如图 5、图 6 所示。模型可搜索最短距离范围内，符合条件的集装箱车辆，节点中车源分布随机，验证了模型和算法的可行性。

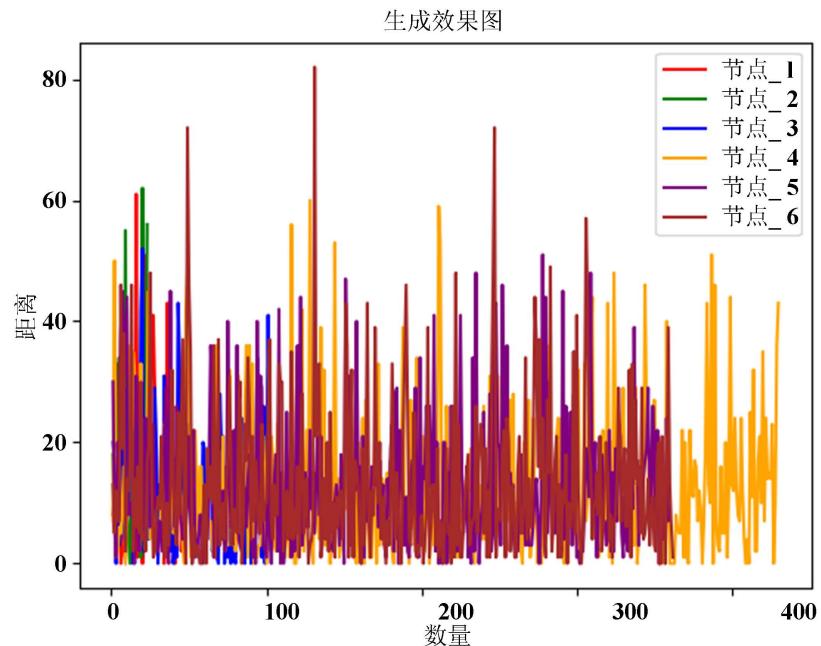


Figure 5. Vehicle source distance generation effect map

图 5. 车源距离生成效果图

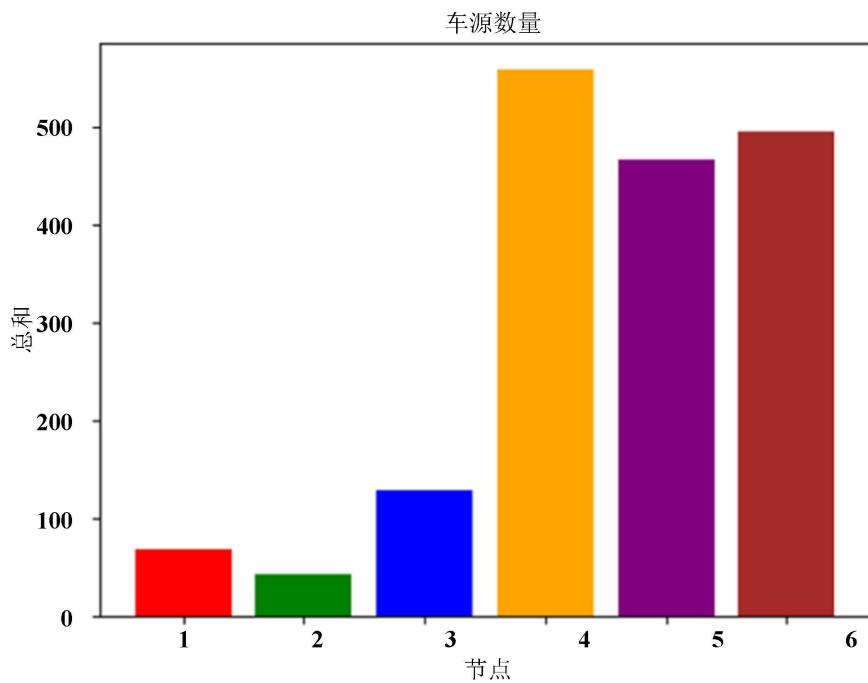


Figure 6. Vehicle source number generation map

图 6. 车源数量生成图

基于 NSGA-II 求解总运输成本最小和总运输时间对本案例的 6 个节点的订单合理安排, 得出如图 7 所示的运输结果图。

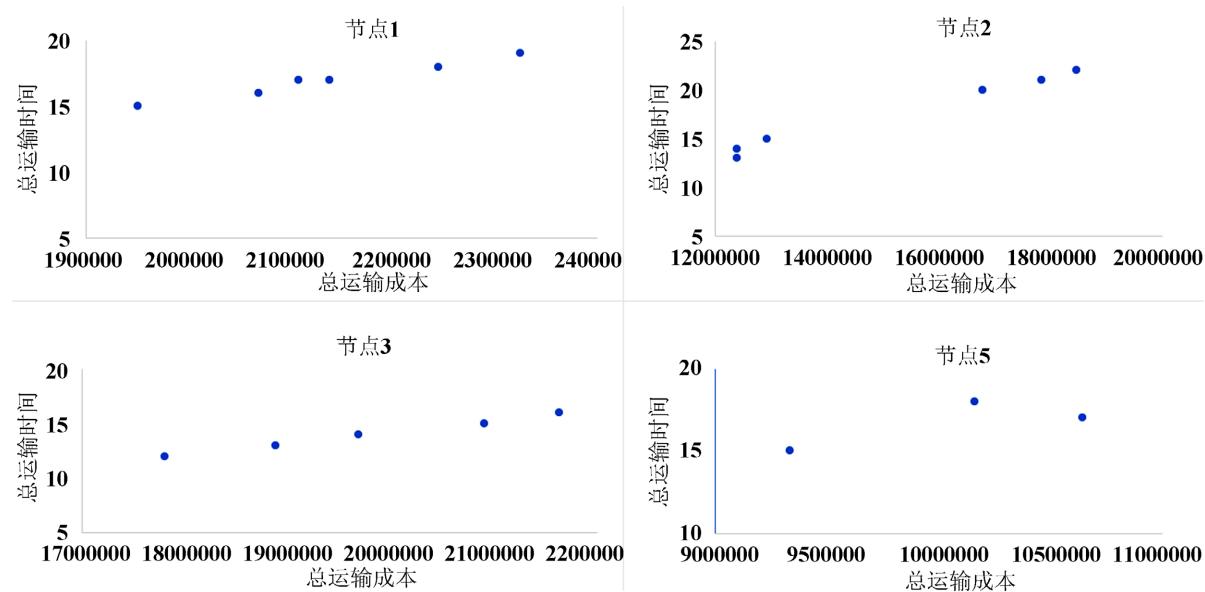


Figure 7. Transportation result map

图 7. 运输结果图

由于节点 5 的货量大于铁路最大运营能力, 所以实行基于网络货运平台的中欧班列货源直达方案。其余节点的货量不能满足铁路最大运营能力, 因此需要实行货源集聚方案。考虑总运输成本和总运输时间最优, 节点 1 和 3 的货源选择集聚运输至节点 4, 与节点 4 处货源编组运输至边境口岸, 最终运输至收货点 10 和 8。节点 2 的货源考虑总运输成本最优, 选择集聚运输至节点 6, 与节点 6 处货源编组运输至边境口岸, 由于运输到节点 8 或节点 9 的总运输成本相同, 可以根据托运人实际出口比例选择方案, 在此考虑时间最优, 选择运输至节点 9 处。

基于网络货运平台的中欧班列货源集聚优化方案, 运输方式、运输路径和货源集聚地组合优化结果, 如表 6 所示。

Table 6. Optimization scheme of combination of transport mode, route and source gathering place
表 6. 运输方式、运输路径与货源集聚地组合优化方案

节点	运输路径	货源集聚地	运输方式
1	1→4→7→10	4	1, 1, 2, 2
2	2→6→7→9	6	1, 1, 2, 2
3	3→4→7→8	4	1, 1, 2, 2
4	5→7→10	5	1, -, 2, 2

6. 结论

本文提出了基于网络货运平台优化中欧班列的运输组织方案, 综合考虑了总运输成本和时间最优, 建立了货源集聚优化模型, 基于网络货运平台的车货匹配选择车源, 并基于 NSGA-II 算法求解模型。对实际案例进行求解, 得到货运订单的运输方式、运输路径和货源集聚地组合优化方案, 通过网络货运平

台为托运人提供运输组织方案。中欧班列网络货运经营者作为承运人税费减少 9%，基于网络货运平台组织中欧班列货源是具有实际意义的。

参考文献

- [1] 赵娟, 林柏梁, 刘畅, 等. 考虑集结时间的中欧班列直达与中转运输优化模型[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(5): 157-164.
- [2] 魏玉光, 谷玉锟, 夏阳, 等. 基于枢纽集结的中欧班列运输组织优化研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 17-25.
- [3] 于雪峤. 中欧班列集并运输组织模式优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(10): 8-13.
- [4] Ma, Y.T., Shi, X.L. and Qiu, Y. (2020) Hierarchical Multimodal Hub Location with Time Restriction for China Railway (CR) Express Network. *IEEE Access*, **8**, 61395-61404. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983423>
- [5] 邓飞, 陆一平, 宋京鸿.“一带一路”背景下企业地域影响力发展的规划研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(5): 221-225.
- [6] 杨佑钊. 中欧班列乌鲁木齐集结中心规划方案研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 35-40.
- [7] Cheng, Z.L., Zhao, L.J., Wang, G.X., Li, H.Y. and Hu, Q.M. (2021) Selection of Consolidation Center Locations for China Railway Express to Reduce Greenhouse Gas Emission. *Journal of Cleaner Production*, **305**, Article id: 126872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126872>
- [8] 刘蒙蒙, 高更君. 基于双层规划的中欧班列集配中心选址研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(5): 1810-1816.
- [9] 王浩然. 考虑时间不确定因素的集装箱公铁联运路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [10] 康禄. 考虑碳排放的公铁联运路径和运输方式选择优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [11] 杨晓蕾. 无车承运人平台的车货匹配与运力调度问题研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [12] 王小文. 平台类无车承运人运力动态调度优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [13] 吴国游. 网络货运平台运力优化调度研究[J]. 中国储运, 2022(11): 58-59.
- [14] 常连玉. 无车承运人货运资源整合研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [15] 韩煜东, 蒋幸福. 网络货运 + 公铁联运物流模式探究[J]. 物流科技, 2022, 45(1): 91-95.
- [16] 王佳颖. 碳约束下中欧班列集结中心选址与运输网络优化研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.