

补贴成本及其所在城市 GDP；服务水平与启运港辐射范围内需求点的需求量有关。

Z_i 为 0-1 决策变量，1 表示备选启运港 i 被选中，否则为 0。 C_i 是启运港年均建设成本（元）， C_b 是与运量相关的运营成本（元/TEU）， C_k 是与运量相关的班列补贴成本（元/TEU）， G_i 是启运港 i 所在城市 GDP（元）， d_i 是需求点经启运港 i 发运走中欧班列的运输量（TEU）。

$$\min W_1 = \sum_i C_i z_i + \sum_i C_b d_i z_i + \sum_i C_k d_i z_i \quad (1)$$

$$\min W_2 = \sum_i \frac{C_k d_i}{G_i} z_i \quad (2)$$

$$\min W_3 = \sum_i \frac{C_b d_i}{G_i} z_i \quad (3)$$

下层模型是站在货主的角度建立流量分配模型，引入用户平衡分配理论，采用 Beckmann 提出的具有固定需求的用户平衡配流模型如下：

$$\min Z(x) = \sum_a \int_0^{f_a} c_a(x) dx \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k h_k^{od} = q^{od} \quad (5)$$

$$f_a = \sum_o \sum_d \sum_k h_k^{od} \zeta_{a,k}^{od} \quad (6)$$

$$c_a^{od} = \sum_a c_a(f_a) \zeta_{a,k}^{od} \quad (7)$$

$$h_k^{od} \geq 0 \quad (8)$$

$$o \in O, d \in D, a \in A, k \in K \quad (9)$$

其中， O 为所有起点集合； D 为所有讫点集合； K 为起点 o 与讫点 d 之间的所有路径的集合； q^{od} 为起点 o 到讫点 d 的交通流量， A 为网络中所有路段的集合， f_a 为路段 a 上的集装箱量， c_a 为路段 a 上的交通阻抗， $c_a(f_a)$ 为路段 a 上以流量为自变量的阻抗函数，也称运输费用函数； h_k^d 为起点 o 到讫点 d 的第 k 条可行路线上的交通流量； c_k^d 为起点 o 到讫点 d 的第 k 条路径的阻抗； $\zeta_{a,k}^d$ 是 0-1 变量，若路段 a 属于起点 o 到讫点 d 的第 k 条可行路线，则 $\zeta_{a,k}^d = 1$ ，否则为 0。

2.2 求解算法

引入多目标遗传算法，NSGA-II 算法。NSGA-II 算法是一种基于 Pareto 最优解，建立在基本遗传算法基础之上的多目标遗传算法，本文应用算法求解上层模型，将求解下层模型的 F-W 算法嵌套在算法中求解整个模型。

3 实例分析

通过调研和查阅统计年鉴，运用原单位法、二次移动平均法和增长率法计算和预测 2020 年起讫点交通量。通过拟合铁路集装箱运输货票数据得到国内铁路包干运费计价一 3.08 元，计价二 1111.8 元，境外宽轨段运价率 0.69 美元/TEU·km，欧盟段运价率 0.96 美元/TEU·km。国内公路运费 7.5 元/TEU·km，国外公路运费 12 元/TEU·km，水路运费 0.71 元/TEU·km，班

列补贴费用 3000 美元/TEU，建设启运港的成本拟定为 500 万元，设计使用年限为 15 年，利用等额本息法按期均分为 47.36 万元/年，启运港单位运营成本 50 元/TEU，BPR 函数的影响参数 α ， β 分别为 0.15 和 4。设置遗传算法种群规模为 20，迭代次数为 200，交叉率为 0.7，变异率为 0.1，使用 matlab 软件，经 200 次迭代后得到 9 个 pareto 最优解如表 2 所示。

表 2 启运港布局优化结果表

方案	最优解	运营成本 (万元)	班列补贴影响	服务水平
1	大红门、塘沽、石南、沈阳东、合肥北、 圃田	58846	198447	27601
2	大红门、太原西、胶州、圃田、吴家山、 银川南	95989	89206	45099
3	石南、太原西、拉萨西、新筑、兰州东川、 双寨、乌北	121791	129065	57225
4	石南、太原西、包头东、团结村、城厢、改貌、 新筑、兰州东川	141703	260956	66595
5	石南、太原西、合肥北、圃田、城厢、改貌、 昆明东、拉萨西、双寨、银川南、乌北	159747	432679	75129
6	长春北、新香坊、合肥北、圃田、吴家山、 团结村、城厢、昆明东、拉萨西、新筑、 兰州东川、乌北	183829	484001	86466
7	大红门、包头东、沈阳东、长春北、新香坊、 合肥北、拉萨西、双寨、乌北	202296	374690	95177
8	大红门、长春北、新香坊、合肥北、圃田、 城厢、拉萨西、新筑、兰州东川、乌北	222536	837814	104724
9	大红门、石南、太原西、合肥北、圃田、 吴家山、团结村、城厢、昆明东、拉萨西、 新筑、兰州东川、银川南、乌北	265870	392453	125075

4 结论

本文构建了陆海国际运输网络，建立了双层多目标规划模型，从实际角度以定量的方法对中欧班列启运港进行布局优化，运用 NSGA II 算法和 F-W 算法对模型进行求解，建立评价指标体系筛选全国开行中欧班列的办理站作为启运港潜在位置，充分考虑海运竞争和班列补贴因素进行实例分析，验证模型合理性的同时对中欧班列启运港布局进行优化，为中欧班列决策者提供参考。

参考文献：

- [1] 李佳峰. “一带一路”战略下中欧班列优化对策研究 [J]. 铁路运输与经济, 2016, 38(05): 41-45.
- [2] 李廷祯. 中欧班列运输市场中的问题及对策——基于运输需求视角 [J]. 中国市场, 2020(07): 136-138.
- [3] 蔡瑞东. 中欧班列开行模式及中心枢纽布局优化研究 [D]. 武汉理工大学, 2018.
- [4] 马蓉. 基于多通道的中欧集装箱运输方案选择研究 [D]. 北京交通大学, 2019.
- [5] 陆梦秋, 陈媛, 陆玉麒, 李恩康. “一带一路”倡议下欧亚大陆陆海运输的空间均衡分析 [J]. 地理学报, 2018, 73(08): 1526-1539.

基金项目：国家自然科学基金资助（71774018）；中国博士后科学基金资助（2015M580128）；港口协同发展与绿色增长资助（IRT17R13）；辽宁省自然科学基金资助（2015020074）；辽宁省高等教育内涵发展专项资金（协同创新中心）资助（20110116102）