

# 考虑物流绩效及规模效益的海上丝绸之路枢纽网络设计与研究

朱小林 陈昌定 姚婉莹

(上海海事大学物流研究中心 上海 201306)

**摘要** 由我国提出的建设海上丝绸之路的倡议,为沿线区域国家贸易带来新的发展机遇。结合特殊政策环境构造符合海上丝绸之路总体贸易格局的海运网络成为促进各国出口贸易的一大关键。针对建立区域整体贸易运输网络,选择具有代表性的 21 个沿线国家,综合枢纽网络的收集、转运、配送、仓储处理成本等要素,将枢纽间干线运输所带来的规模经济效应和各个国家的物流绩效进行量化。构建基于单分配、线型网络结构特征的二层轴辐网络优化模型,旨在特定实际环境下,通过调整枢纽选址降低网络运输成本,提高区域性贸易运输网络的可行性,论证其经济意义。根据遗传算法对所建模型进行求解,并通过算例分析方式对两种枢纽网络进行比较,选择出更加符合海上丝绸之路沿线区域联动发展的贸易海运网络。

**关键词** 枢纽选址 遗传算法 物流绩效 规模效益 海上丝绸之路

**中图分类号** TP399 U115 F551 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.11.010

## DESIGN AND STUDY OF MARITIME SILK ROAD HUB NETWORK CONSIDERING LOGISTICS PERFORMANCE AND SCALE BENEFITS

Zhu Xiaolin Chen Changding Yao Wanying

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** The proposal put forward by China for the construction of the “21st Century Maritime Silk Road” has brought new opportunities for the development of trade in the countries along the road. Combining a special policy environment to construct a maritime network that conforms to the overall trade pattern of the Maritime Silk Road has become a key to the promotion of export trade in all countries. In response to the establishment of a regional overall trade transport network, we selected 21 representative countries along the route. We also combined the elements of collection, transshipment, distribution, and warehousing processing costs of the hub network, and quantified the scale economies effect brought by the trunk transport between hubs and the logistics performance of each country. A two layer hub and spoke network optimization model was constructed based on single allocation and linear network structure characteristics. It aimed to reduce the cost of network transportation by adjusting the site selection of hubs in a specific practical environment, improve the feasibility of regional trade transport networks, and demonstrate its economic significance. The proposed model was solved by the genetic algorithm. The two hub networks were compared by the example analysis. We chose a trade and shipping network that was more in line with the regional development along the Maritime Silk Road.

**Keywords** Hub location Genetic algorithm Logistics performance Scale benefits Maritime Silk Road

## 0 引言

2013 年中国提出建设 21 世纪海上丝绸之路的倡议,这是中国推行全方位对外开放、构造新格局的重要

组成部分,同时也契合东南亚、南亚及非洲等国家的共同需求,随后我国政府与沿线国家一同推行了一系列政策措施推动倡议。据联合国商品贸易部统计,海上丝绸之路沿线国家贸易需求不断扩大,2015 年海上丝绸之路沿线 27 国进口总量达到 27 756.23 亿美元,

十六年间平均增长率为 12.21%<sup>[1]</sup>。2017 年,我国正式提出“一带一路”建设海上合作设想。截至目前,仅海上丝路沿线表示支持并愿意参与的国家已经超过 50 个。面临当前海上丝绸之路辐射范围不断扩大、发展愈加复杂的情况,充分发挥国家间资源整合优势以及贸易网络中国家的枢纽作用,实现沿线区域贸易运输联动发展是促进海上丝绸之路进一步发展的重要前提。

在海运贸易中,相较于传统运输模式,具有集中货运流量、优化运输路线、节约运输成本等显著优势的轴辐式网络已成为港口航线网络的典型形式,其枢纽选址与设计问题最早由 O'Kelly 提出<sup>[2]</sup>。在相关研究中,其网络枢纽选址问题具有两项常见的假设:每条 OD(Origin to Destination)流都必须通过至少一个枢纽点,节点间通过干线、支线进行连接<sup>[3]</sup>;干线运输具有规模效益,当中转流量达到固定阈值时干线运输成本降低<sup>[4]</sup>。近年来国内外学者对此进行大量研究:根据节点分配情况的不同,单分配轴辐式网络中一个枢纽节点仅与一个辐节点相连,此枢纽设计问题可以转化为在指定约束下的总运输成本最小化问题<sup>[5-6]</sup>,例如丁一考虑沿海捎带情况下,将轴辐式物流网络转化为无容量限制的单分配多枢纽中位 0-1 整数规划问题<sup>[7]</sup>;多分配轴辐式网络枢纽选址设计问题可以转化为在需求流量、运输时间等约束条件下的总运输成本最小化问题<sup>[8]</sup>,考虑到枢纽运输能力的选择与均衡利用,则需要将枢纽点建设成本转化成和容量等级相关的函数,加进传统枢纽选址模型中,枢纽点能力等级的评价与均衡性策略直接影响轴辐式物流网络的整体运作效率<sup>[9]</sup>,当枢纽出现故障而中断时,便会增加其他枢纽点设施中转压力,和发生故障前对比,增加了其指定路径运输成本<sup>[10]</sup>。关于其他枢纽网络模式研究方面,一些学者对枢纽网络特定拓扑结构进行研究,提出了以总加权运输时间最小化为目标的线型枢纽网络<sup>[11]</sup>。

近年来,在国家贸易发展分析方面,由于物流绩效对于各个国家经济增长及贸易情况分析具有重要参考价值,国内外学者开始以物流绩效指数为切入点、大量采用定性方法研究。例如樊秀峰等<sup>[12]</sup>对海上丝绸之路沿线国家的 LPI 及分项指标进行定性描述与分析并拓展贸易引力模型,分析了物流绩效对中国进出口贸易的影响;鄢飞等<sup>[13]</sup>对丝绸之路经济带相关国家物流绩效水平进行比较分析,找出存在的问题及其影响因素,并提出有针对性的发展建议;孙慧等<sup>[14]</sup>运用世界银行提供的国际物流绩效指数实证分析“一带一路”国际物流绩效对中国中间产品出口的影响;Roy 等<sup>[15]</sup>采用两阶段的方法框架来深度挖掘 LPI 数据集,将六

个 LPI 维度与宏观经济变量联系起来。

上述关于海上丝绸之路贸易发展研究中,并未从区域角度出发,构造整体贸易运输网络、把握其空间网络格局,并缺少对特殊政策环境下不同贸易运输枢纽网络的设计与比较以及对物流绩效指数与运输网络结合进行定量分析论证的研究。本文考虑到海上丝绸之路各贸易国的物流绩效影响枢纽中心中转处理效率,在参考文献的基础上,创新性地提出引入 LPI 倒数值来衡量枢纽仓储处理成本;同时,考虑到不同网络结构的特征、优劣与实际国家地理位置的分布,分别设计单分配轴辐网络与线型枢纽网络,这也是本文相对于以往研究的创新之处。根据枢纽间干线规模集聚效益的大小以及政策给予的贸易运输优惠,引入干线规模折扣系数  $q$  来衡量枢纽点之间的转运成本。最后,根据模型设计出遗传算法进行有效求解,从枢纽数量、枢纽性变化、规模折扣系数、总成本等多因素为参照对两种网络进行比较,选择适用于海上丝绸之路各贸易国之间运输的网络结构,打造基于海上丝绸之路新环境下的区域贸易海运网络。

## 1 问题描述

本文重点针对“21 世纪海上丝绸之路”的贸易海运网络,从区域整体性角度进行分析,设计符合丝路特色的多国参与协作的海运贸易网络。参与海上丝绸之路的众多国家涉及多个地区,各国 GDP、人口等各项情况不同,为了更加合理、聚焦地研究,以如下四项条件为参考选取节点国家:1) 经济条件:人均收入在 8 000 美元以上;2) 国家处于海上合作设想中的路线上;3) 该国官方支持并愿意加入“一带一路”;4) 和中国近年来有较频繁的贸易往来。经过筛选,本文共找到从欧洲至东南亚的 21 个国家,如图 1 所示:意大利、土耳其、埃及、沙特阿拉伯、也门、索马里、肯尼亚、巴基斯坦、印度、斯里兰卡、孟加拉、中国、缅甸、老挝、越南、泰国、柬埔寨、新加坡、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾。

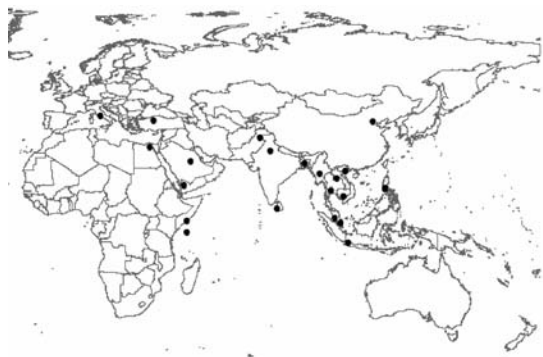


图 1 21 个海上丝绸之路沿线国家分布图

同时,本文研究的枢纽网络是以国家作为节点的单分配二层轴辐网络,如图2所示。其中,枢纽点国家承担海运贸易进出口货物的收集、转运、配送,每个辐节点国家只被分配给一个枢纽点,整个网络中无容量限制;在干线运输枢纽点两两联通的网络基础上,提出以枢纽点间最短路径为唯一干线的线型枢纽网络。

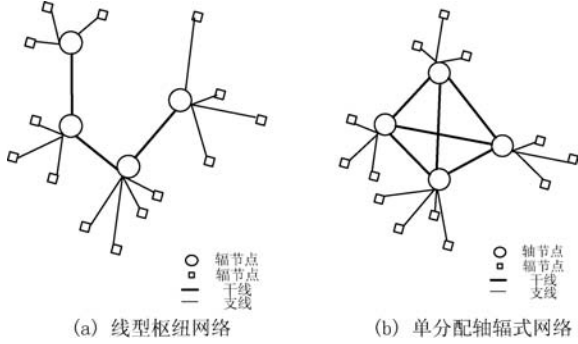


图2 两种类型枢纽网络图

单分配轴辐式网络及线型枢纽网络的总成本由运输(收集、转运、配送)成本及仓储处理成本组成;考虑到各国的物流绩效指数对其枢纽中心中转处理效率的影响,提出以LPI倒数值为参数来调节枢纽转运点的处理成本大小。在线型枢纽网络中,每条OD流都将通过枢纽中心流入一条干线进行集散,干线货流量增大,能够获得因规模效益产生的运价折扣,故引入干线规模折扣系数 $q$ 来衡量各贸易国之间的转运成本, $q$ 介于 $0 \sim 1$ 之间。

综上,从枢纽选址、物流绩效、干线运输规模效益、总成本等方面对构造的单分配轴辐式网络、线型枢纽网络进行设计,优化流量分配;并比较分析网络枢纽选址特征、成本变化等,结合实际提出适用于海上丝绸之路沿线的海运枢纽运输网络。

## 2 模型建立

根据问题分析,以21世纪海上丝绸之路贸易国间海运枢纽网络的总成本最小化为目标函数,构建单分配轴辐式网络和线型枢纽网络的数学模型(模型相关的符号说明见表1)。

表1 模型符号定义

| 符号                       | 含义  |
|--------------------------|---|
| $A = \{1, 2, \dots, n\}$ | 枢纽网络的节点集合, $i, j, k, l \in A$                 |
| $p$                      | 枢纽点数量   |
| $d_{ij}$                 | $i$ 到 $j$ 的距离, $d_{ij} = d_{ji}$ , 该距离满足三角不等式 |
| $F_{ij}$                 | 从节点 $i$ 到 $j$ 的流量                             |

续表1

| 符号                            | 含义   |
|-------------------------------|--|
| $O_i = \sum_{j \in A} F_{ij}$ | 流出节点 $i$ 的所有流量   |
| $D_i = \sum_{j \in A} F_{ji}$ | 流入节点 $i$ 的所有流量   |
| $C_1$                         | 单位距离内,辐节点与轴节点间流量的单位收集成本  |
| $C_2$                         | 单位距离内,辐节点与轴节点间流量的单位配送成本  |
| $C_3$                         | 单位距离内,枢纽间货流量的单位转运成本  |
| $C_4$                         | 枢纽节点 $k$ 的单位流量处理成本   |
| $L_k$                         | 物流绩效指数, $L_k \in [1, 5]$   |
| $q$                           | 折扣系数, $0 \leq q \leq 1$  |
| $y_k$                         | 流经枢纽点 $k$ 的总流量   |
| $T_{ikl}$                     | 从节点 $i$ 出发,通过枢纽 $k$ 与 $l$ 的流量                                      |
| $T_{ik}$                      | 从节点 $i$ 出发,通过所属枢纽点 $k$ 的流量   |
| $T_{ki}$                      | 从所属枢纽点 $k$ 流入到其辐射节点 $i$ 的流量  |
| $B_k$                         | 建造枢纽点 $k$ 的固定成本  |
| $x_{ik} \in \{0, 1\}$         | 当节点 $i$ 被分配给枢纽 $k$ 时 $x_{ik} = 1$ , 否则为0; $x_{kk} = 1$ 表示 $k$ 为枢纽点 |

在模型中,枢纽网络的总成本由五部分构成:第一部分是收集成本,即为由辐节点运往枢纽点所产生的运输成本;第二部分为配送成本,是枢纽点向服务的辐节点配送产生的运输成本;第三部分则是枢纽点间干线运输的转运成本;第四部分是枢纽点的中转处理成本;第五部分是枢纽点的固定建造成本。在运输模式为单分配轴辐式网络时,折扣系数 $q = 1$ ;而当采用线型枢纽网络时,折扣系数取 $(0, 1)$ 之间的可变数值。

在给定的枢纽网络 $G$ 中,选定 $p$ 个节点作为枢纽点,任意一对节点之间都存在OD流。模型如下:

$$\min F = \sum_{i, k \in A} C_1 O_i d_{ik} x_{ik} + \sum_{i, k \in A} C_2 D_i d_{ki} x_{ik} + q \sum_{i, k, l \in A} C_3 T_{ikl} d_{kl} + \sum_{k \in A} C_4 \frac{1}{L_k} y_k x_{kk} + \sum_{k \in A} B_k x_{kk} \quad \forall i, k, l \in A \quad (1)$$

s. t.

$$y_k = \sum_{i \in A} (F_{ki} + F_{ik})(1 - x_{ik}) + \sum_{i \in A} (T_{ik} + T_{ki}) \quad \forall k \in A \quad (2)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad \forall i, k \in A \quad (3)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad \forall i, k \in A \quad (4)$$

$$\sum_l T_{ikl} - \sum_l T_{ilk} = O_i x_{ik} - \sum_j F_{ij} x_{ik} \quad \forall i, k, l \in A \quad (5)$$

$$\sum_{l \neq k} T_{ikl} \leq O_i x_{ik} \quad \forall i, k, l \in A \quad (6)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i,k \in A \quad (7)$$

$$T_{ikl} \geq 0 \quad \forall i,k,l \in A \quad (8)$$

目标函数式(1)表示总成本最小。约束条件中,式(2)表示枢纽点  $k$  中转处理的总流量;式(3)表示节点分配关系;式(4)代表非枢纽点只能分配给枢纽点;式(5)表示节点的流量平衡约束;式(6)表示从节点  $i$  出发经过枢纽  $k,l$  的流量小于所有从  $i$  出发的总流量;式(7)表示  $x_{ik}$  为 0-1 决策变量; $T_{ikl}$  流量的非负限制如式(8)所示。

### 3 算法研究

本文采用遗传算法求解单分配轴辐式网络及线型枢纽网络的选址问题。针对此类 NP-Hard 问题,在应用遗传算法求解时,本文对编码方式进行优化以更加合理地选择枢纽点,并对交叉算子、变异算子做出合理调整。结合模型,本文算法设计的具体步骤如下:

**步骤 1** 初步处理获取的节点流量、位置及各项成本数据集。

**步骤 2** 导入数据集,建立模型,设定遗传算法的相关参数,并根据变量范围和约束条件产生初始种群(枢纽点选址),如图 3 所示。其中,定义执行代数=100,交叉概率=0.8,变异概率=0.6,并设计每次结果均显示画图。

示,该染色体中被选择为枢纽点的位置为:19、21、3、4、16、9。

表 2 遗传算法染色体编码

| 节点序号 | 随机编码值    | 节点序号 | 随机编码值   |
|------|----------|------|---------|
| 19   | 0.958 0  | 6    | 0.563 1 |
| 21   | 0.937 3  | 14   | 0.494 9 |
| 3    | 0.819 7  | 5    | 0.474 7 |
| 4    | 0.818 9  | 17   | 0.433 2 |
| 16   | 0.816 2  | 8    | 0.252 0 |
| 9    | 0.791 2  | 18   | 0.424 4 |
| 20   | 0.754 99 | 1    | 0.401 1 |
| 13   | 0.695 4  | 12   | 0.277 8 |
| 11   | 0.649 4  | 15   | 0.217 5 |
| 10   | 0.620 6  | 7    | 0.121 7 |
| 2    | 0.581 2  |      |         |

**步骤 4** 解码——按照就近原则将各个节点分配给距离最近的枢纽点,解码所得 21 个节点的分配关系如图 4 所示。计算距离矩阵  $D$ ,其中,当枢纽间为线型连接时,引入最短路 dijksta 求解方法,选择枢纽间最路径,对连接方式进行优化。

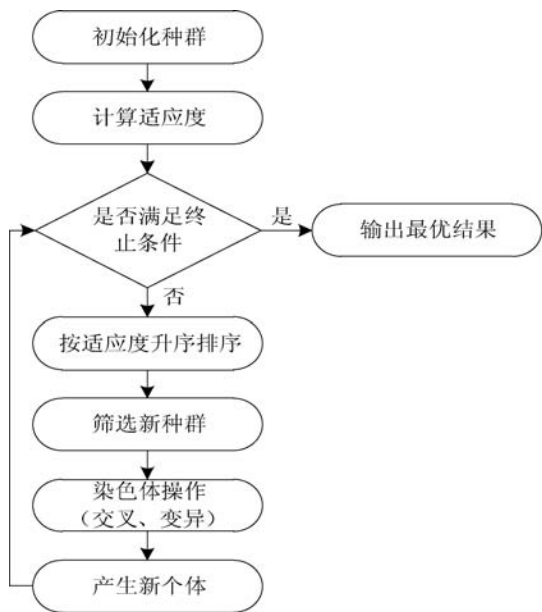


图 3 遗传算法流程图

**步骤 3** 编码——初始化种群  $P$ , 包含  $P$  个染色体  $P_i(i_1, i_2, \dots)$ , 采用实数连续编码的方式构造染色体, 各个染色体编码的实数取值范围设为  $[0, 1]$ , 基因位上对应实数值按数值由大到小的顺序排列, 前  $p$  个为枢纽点。例如, 其随机产生的一条染色体如表 2 所

| 节点序号 | 所属枢纽点序号 |
|------|---------|
| 1    | 3       |
| 2    | 3       |
| 3    | 3       |
| 4    | 4       |
| 5    | 4       |
| 6    | 4       |
| 7    | 4       |
| 8    | 9       |
| 9    | 9       |
| 10   | 16      |
| 11   | 9       |
| 12   | 21      |
| 13   | 16      |
| 14   | 16      |
| 15   | 16      |
| 16   | 16      |
| 17   | 16      |
| 18   | 20      |
| 19   | 19      |
| 20   | 20      |
| 21   | 21      |

图 4 遗传算法解码结果

**步骤 5** 根据解码结果形成父代种群, 计算其目标函数值(成本计算), 并按照轮盘赌的方式进行选择操作。

**步骤 6** 交叉——将两个父代个体上对应的位置相乘, 若得到的新个体中基因 1 的个数小于待选择的枢纽点个数, 则随机选择一个位置上的载体使其为 1, 直至新个体中基因 1 个数等于待选择的枢纽点个数, 如下所示:

a. 父代

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

b. 子代

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

**步骤 7** 变异——交叉所得新个体, 将该个体代替第一个父代。变异方式为随机产生两个位置, 将其位置上的基因进行交换, 如下所示, 在位置 1 与位置 5 发生变异:

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

**步骤 8** 根据目标函数值记录每次迭代的结果, 将最优值保留下来, 输出计算结果。

## 4 算例分析

根据上文问题描述中国家选择标准, 本文设置海上丝绸之路沿线 21 个国家(意大利、土耳其、埃及、沙特阿拉伯、也门、索马里、肯尼亚、巴基斯坦、印度、斯里兰卡、孟加拉、中国、缅甸、老挝、越南、泰国、柬埔寨、新加坡、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾)为运输节点, 构造单分配轴辐式及线型枢纽网络, 从联合国贸易商品统计数据库网站(<https://comtrade.un.org/>)中下载并整理上述国家 2016 年间的相互出口贸易量, 作为 OD 流量矩阵; 各国家物流绩效指数见表 3。节点之间的货流量  $W_{ij}$ 、距离  $d_{ij}$  是已知的; 设辐节点与枢纽间单位距离/运量的收集成本为  $C_1 = 3$ 、配送成本为  $C_2 = 2$ 、枢纽间转运成本  $C_3 = 0.75$ ; 单位流量的仓储处理费用  $C_4 = 0.3$ ; 各个枢纽点的固定建造费用为 20 000 000 元。本文算例实验均在 MATLAB R2016a 软件上执行。

表 3 21 个国家 2016 年物流绩效指数

| 编号 | 国家名称  | 物流绩效指数(LPI) |
|----|-------|-------------|
| 1  | 意大利   | 3.76        |
| 2  | 土耳其   | 3.42        |
| 3  | 埃及    | 3.18        |
| 4  | 沙特阿拉伯 | 3.16        |
| 5  | 也门    | 2.3         |
| 6  | 索马里   | 1.75        |
| 7  | 肯尼亚   | 3.33        |
| 8  | 巴基斯坦  | 2.92        |
| 9  | 印度    | 3.36        |
| 10 | 斯里兰卡  | 2.68        |
| 11 | 孟加拉   | 2.66        |
| 12 | 中国    | 3.66        |
| 13 | 缅甸    | 2.66        |
| 14 | 老挝    | 2.07        |
| 15 | 越南    | 2.98        |
| 16 | 泰国    | 3.26        |
| 17 | 柬埔寨   | 2.8         |
| 18 | 新加坡   | 4.14        |
| 19 | 印度尼西亚 | 2.98        |
| 20 | 马来西亚  | 3.43        |
| 21 | 菲律宾   | 2.86        |

O'Kelly 等<sup>[16]</sup>的研究中曾提到当  $q$  按 0.2 个单位取值递减时, 节点的枢纽性会发生变化。本文研究的各国海运出口贸易量较大, 基于此, 本文将以 0.1 个递减单位为  $q$  取值, 研究规模折扣系数的变化对于总成本的影响。假设规模效益折扣系数  $q \in \{0.6, 0.7, 0.8\}$ ,  $p \in \{4, 5, 6, 7\}$ 。算法求解如图 5 所示:  $G_n$  即迭代次数,  $F_v$  即适应度值(总成本和); 随着迭代次数增加, 遗传算法所求目标函数值不断降低, 趋于最优。

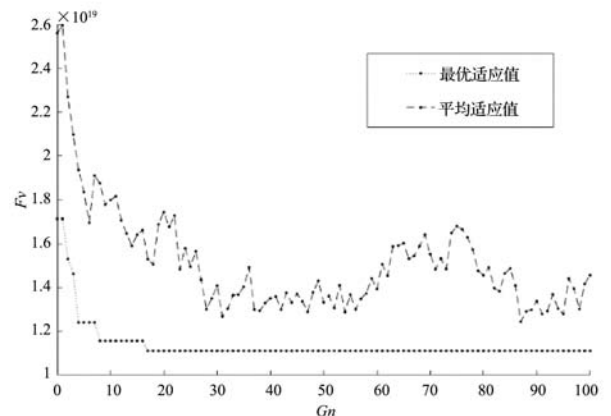


图 5 遗传算法求解图

根据算法求解,两种网络结构(单分配轴辐式网络及线型枢纽网络)求解结果如表 4、表 5 所示,枢纽选址为该网络在对应  $q$  和  $p$  值下的最佳枢纽选址处的点序号,总成本即为选择对应枢纽选址时网络总成本最小值。

表 4 单分配轴辐式网络枢纽选址及总成本

| $p$ | $q$ | 枢纽选址              | 总成本/元               |
|-----|-----|-------------------|---------------------|
| 4   | 1   | 9,12,13,18        | 137 017 760 760 000 |
| 5   | 1   | 4,9,12,13,19      | 133 146 707 570 000 |
| 6   | 1   | 4,9,12,13,16,19   | 124 165 549 920 000 |
| 7   | 1   | 4,7,9,12,13,16,18 | 122 567 828 480 000 |

表 5 线型网络枢纽选址及总成本

| $p$ | $q$ | 枢纽选址              | 总成本/元               |
|-----|-----|-------------------|---------------------|
| 0.6 | 4   | 2,12,13,18        | 124 775 777 860 000 |
|     | 5   | 2,9,12,13,19      | 111 654 132 210 000 |
|     | 6   | 2,9,12,13,18,19   | 108 213 942 042 000 |
|     | 7   | 2,4,9,12,13,18,19 | 86 366 969 430 000  |
| 0.7 | 4   | 2,12,13,19        | 132 339 106 740 000 |
|     | 5   | 3,9,12,13,18      | 129 363 365 830 000 |
|     | 6   | 2,8,9,12,13,19    | 123 257 002 520 000 |
|     | 7   | 2,8,9,12,13,18,19 | 116 753 688 554 000 |
| 0.8 | 4   | 2,12,13,19        | 140 850 872 600 000 |
|     | 5   | 2,9,12,13,19      | 136 657 141 500 000 |
|     | 6   | 3,9,12,13,19,20   | 128 292 036 590 000 |
|     | 7   | 2,5,9,12,13,19,20 | 120 553 134 830 000 |

如表 4 所示,单分配轴辐式网络中当枢纽点数量增加时,枢纽网络运输及处理能力提高,枢纽建造成本虽有所增加,但网络总运输成本呈降低趋势。当选择 7 个国家建设海运枢纽中心满足整体货运需求时,网络总成本最小,约为  $1.225\ 67 \times 10^{15}$  元。如表 5 所示,线型枢纽网络中枢纽数量、规模折扣系数  $q$  均与网络总成本呈正比关系,当折扣系数  $q=0.6$  且枢纽点数量  $p=7$  时,线型枢纽网络总成本取得最小值,约为  $8.636\ 69 \times 10^{14}$  元。

分析表 4、表 5 中的数据,可得出以下结论:

(1) 在选择枢纽节点时,两种运输网络存在着共性和不同。在单分配轴辐式网络中,沙特、肯尼亚、印度、中国、缅甸、泰国、新加坡多次被选作枢纽中心建设国家承担整个网络的中转运输,这些国家本身大多是

海上丝绸之路沿线国家中出口贸易量较大的,各个国家物流绩效指数在临近国家间较高,在其地域内建设海运枢纽中心,将具有更高效的中转处理效率及更广的辐射作用。在线型枢纽网络的选址中,除在单分配轴辐式网络中同样被选作枢纽的沙特、印度、中国、缅甸、新加坡之外,土耳其、埃及、印度尼西亚、马来西亚因自身出口贸易量较大、地理位置优越且物流绩效指数值较高,也被选为枢纽连成中转线路。

(2) 在枢纽选址中存在相邻节点枢纽性质发生变化的情况。当所选枢纽点数量不同或规模折扣系数不同时,例如单分配轴辐式网络中, $P=4$  时 18 号节点新加坡被选为枢纽国家,19 号节点印度尼西亚是其服务范围内的辐节点,而当  $P=5$  时两点的枢纽性质改变,类似的情况还有线型枢纽网络中 2/3/19/20 节点等。出现上述枢纽性变化的原因在于,当枢纽选址数量及规模折扣系数变化时,区位条件、出口贸易量、物流绩效指数等选择枢纽点的条件对运输距离、运输处理成本、中转效率及规模集聚程度等产生较大影响,基于总成本最小化的目标函数其选址结果发生合理改变。

根据表 4、表 5,本文绘制图 6 综合反映枢纽数量、干线运输折扣系数对于两种网络总成本的影响,并可直观看出两种网络成本的变化趋势及优劣。

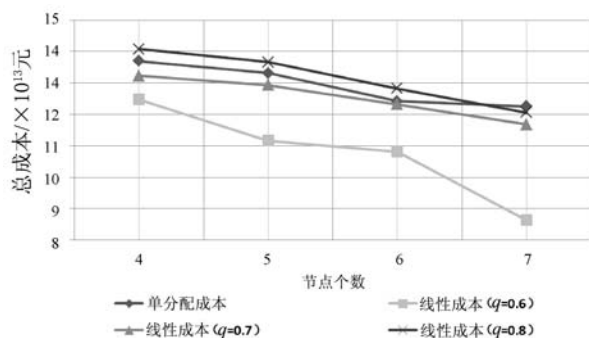


图 6 单分配轴辐模式与线型模式成本变化趋势图

分析图 6,本文认为在枢纽选址数量不变的条件下,折扣系数的调整对于降低线型枢纽网络总成本具有较大影响,两者呈正相关关系;两种网络模型中,枢纽中心数量的增加虽都会引起建设投入资本及仓储处理成本增大,但同时也可缓解枢纽处理能力达到瓶颈的问题,使得辐节点的分配更加均衡,起到了降低总运输成本的作用。

在实验结果的基础上,笔者绘制单分配轴辐式网络及线型枢纽网络结构图。对于单分配轴辐式网络,如图 7 所示,在各选中国建设大型海运枢纽中转中心,干线运输采用两两对接的方式,其具有连通性好、运输线路直接等优点,但整体所具有的规模效益不大,成本较高。

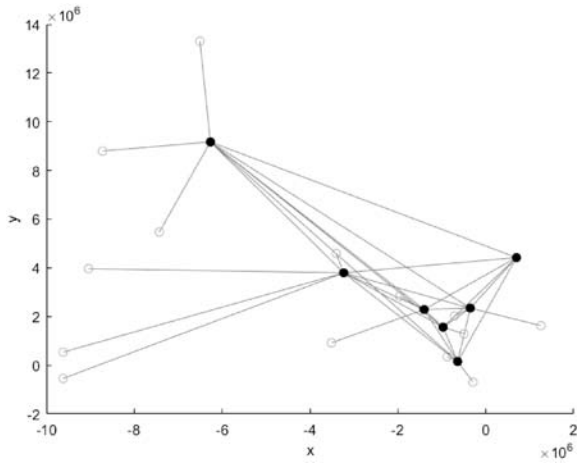


图7 单分配轴辐式网络图( $p=7$ )

线型枢纽网络如图8所示,其枢纽中心间航线连成一条主干线,规模集聚效应更加突出,资源利用率大幅提高。在选择数量相同的枢纽点情况下,折扣系数小于0.7时,线型枢纽网络的总成本将低于单分配轴辐式网络。由此可知,在共建海上丝绸之路的背景下,将线型枢纽网络纳入建设考量,以枢纽国家的重点港口、中心城市为支撑,加强海上航道建设,不仅符合海上丝绸之路的地理结构特征,同时有利于充分发挥规模效益,带动沿线国家的海运出口贸易,打造具有强大产业聚集效能的经济走廊,促进沿线地区经济增长及友好交往。

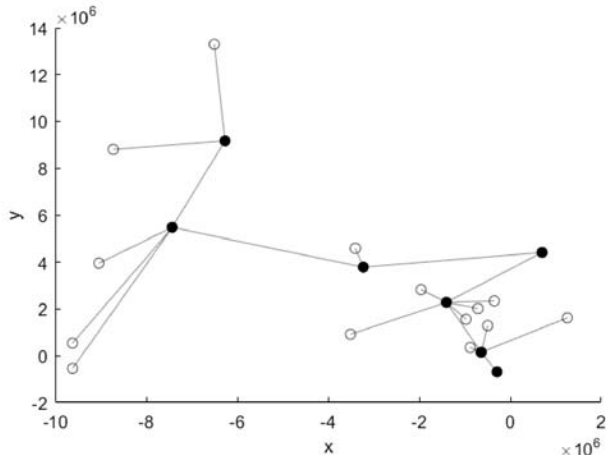


图8 线型枢纽网络图( $p=7, q=0.6$ )

通过对实验结果的分析,本文认为规模效益折扣、物流绩效、枢纽选址及其数量对于运输枢纽网络总成本具有重要影响。一方面,在建立运输网络、衡量总成本时,应将打造“21世纪海上丝绸之路”倡议不断推行后各国加强贸易、互联互通引起的规模效应、枢纽选址及数量变动综合考虑其中,折扣系数的大小应参照国家间贸易政策和实际出口贸易情况调整,枢纽数量及选址则根据运输网络承担的总货运量及各贸易国区位、经济条件等确定;另一方面,在如何更加合理地

选择枢纽节点,优化枢纽网络时,物流绩效指数作为影响枢纽节点中转处理效率的主要参数具有积极影响,应纳入枢纽建设中予以考虑,同时,国家也应重视对于海运物流水平的提高。

如图9所示,线型枢纽网络结构是符合海上丝绸之路特定网络结构所建立的新型海运枢纽网络,相比单分配轴辐式网络,其更加适合于沿线出口海运贸易,有效降低干线运输成本,通过规模效应集聚带动海运航线发展。同时对于非海上丝绸之路的其他国家地区也起到吸引作用,这些国家将作为辐节点被纳入线型枢纽网络中,共同享受贸易上的优惠政策,促进“一带一路”倡议影响范围的延伸。在线型枢纽网络选址中,印度尼西亚、马来西亚等国被频繁选作枢纽中心建设国家,也证明了中国同东盟尤其是印尼、马来西亚在海上丝绸之路建设上的合作潜力,符合我国将东南亚建成21世纪海上丝绸之路示范区的新愿景。

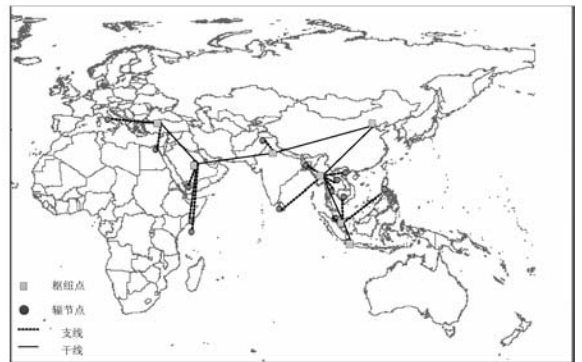


图9 海上丝绸之路21个国家线型运输网络图

## 5 结语

在海上丝绸之路影响范围日益增大,各国重视海洋经济、推动海上合作的背景下,本文选择具有代表性的21个海上丝绸之路沿线主要国家,提出从国家间整体贸易运输格局出发研究海运枢纽网络的新设想。本文引入物流绩效指数及干线运输规模折扣,利用运输成本最小化原理,选择不同的枢纽连接方式,构造单分配轴辐式网络与线型枢纽网络,提出建设符合海上丝绸之路结构特征的海运线型枢纽网络模型。为了比较单分配轴辐式网络与线型枢纽网络,进行了以下对比实验:(1)改变枢纽点数目,比较两种结构选择最优网络设计时的网络成本及枢纽配置;(2)通过改变干线运输规模折扣系数,比较两种网络在网络成本方面的变化。同时,本文也充分考虑了物流绩效指数的高低对于枢纽中心选址的影响。

通过算例分析,结果表明,在海上丝绸之路沿线各国对外出口贸易运输中建立具有特殊的线型枢纽网

络,符合海上丝绸之路各国地理位置分布,同时能够将沿线国家地区紧密联系起来,集中干线运输货运量,比其单分配轴辐式网络,大大降低网络总成本。且物流绩效指数的高低、实际枢纽点数量需求以及货流量引导的干线运输规模折扣对于网络总成本均有显著影响。在各个国家建设枢纽中心时,应综合考虑网络枢纽需求量、周边节点枢纽性变化、自身容量限制等条件;物流绩效指数能够给予各国家发展出口贸易的有效参考。本文还印证了从区域整体性角度、把握贸易运输总格局对于我国海上合作设想、积极寻求与东盟等各地区国家合作具有积极作用。

文中的模型和分析将拓展到“一带一路”背景下的各国贸易运输和区域性港口运输网络的优化,进行进一步的验证与修正。同时,考虑到模型在实际问题中面对节点分配及需求不确定性、容量限制等求解的复杂性,将设计适应大规模轴辐式网络中多级容量限制及不确定 OD 流下的多分配模型算法。

## 参 考 文 献

- [1] 夏维华. 二十一世纪海上丝绸之路沿海国家进口需求变化与中国的战略优势[J]. 对外经贸实务, 2016(6): 17-20.
- [2] O'Kelly M E. The Location of Interacting Hub Facilities [J]. *Transportation Science*, 1986, 20(2): 92-106.
- [3] Alumur S A, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. Hub location under uncertainty[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2009, 43(3): 529-543.
- [4] Abdinnour-Helm S, Venkataramanan M A. Solution approaches to hub location problems[J]. *Annals of Operations Research*, 1998, 78(78): 31-50.
- [5] Cunha C B, Silva M. A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 747-758.
- [6] Jeong S J, Lee C G, Bookbinder J H. The European freight railway system as a hub-and-spoke network[J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2007, 41(6): 523-536.
- [7] 丁一, 刘朝德, 林国龙. 基于沿海捎带的轴辐式海运网络优化模型[J]. *中国管理科学*, 2015(S1): 830-835.
- [8] 倪玲霖, 史峰. 多分配快递轴辐网络的枢纽选址与优化方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012(2): 441-448.
- [9] 胡晶晶, 胡志华, 魏晨. 考虑枢纽能力选择与均衡利用的轴辐式网络设计[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)* 2015(8): 1130-1136.
- [10] Azizi N, Chauhan S, Salhi S, et al. The impact of hub failure in hub-and-spoke networks: Mathematical formulations and solution techniques[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 65: 174-188.
- [11] Contreras I, Camargo R S D, Miranda G D. The Hub Line Location Problem[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(3): 500-518.
- [12] 樊秀峰, 余姗. “海上丝绸之路”物流绩效及对中国进出口贸易影响实证[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2015(3): 13-20.
- [13] 鄢飞, 王译. 基于 LPI 的丝绸之路经济带物流绩效分析[J]. *中国流通经济*, 2016, 30(8): 28-34.
- [14] 孙慧, 李建军. “一带一路”国际物流绩效对中国中间产品出口影响分析[J]. *社会科学研究*, 2016(2): 16-24.
- [15] Roy V, Mitra S K, Chattopadhyay M, et al. Facilitating the extraction of extended insights on logistics performance from the logistics performance index dataset: A two-stage methodological framework and its application [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2017.
- [16] O'Kelly M E, Bryan D, Skorin-Kapov D, et al. Hub network design with single and multiple allocation: A computational study[J]. *Location Science*, 1996(4): 125-138.
- ~~~~~
- (上接第 60 页)
- [27] Liu X, Ivanescu L, Kang R, et al. Real-time household load priority scheduling algorithm based on prediction of renewable source availability[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(2): 318-326.
- [28] Marinescu A, Harris C, Dusparic I, et al. Residential electrical demand forecasting in very small scale: An evaluation of forecasting methods[C]// *International Workshop on Software Engineering Challenges for the Smart Grid*. IEEE, 2013: 25-32.
- [29] Humeau S, Wijaya T K, Vasirani M, et al. Electricity load forecasting for residential customers: Exploiting aggregation and correlation between households[C]// *Sustainable Internet and ICT for Sustainability*. IEEE, 2013: 1-6.
- [30] Veit A, Goebel C, Tidke R, et al. Household electricity demand forecasting: benchmarking state-of-the-art methods [C]// *Proceedings of the 5th international conference on Future energy systems*. ACM, 2014, 233-234.
- [31] Haben S, Ward J, Greetham D V, et al. A new error measure for forecasts of household-level, high resolution electrical energy consumption [J]. *International Journal of Forecasting*, 2014, 30(2): 246-256.
- [32] Hsiao Y H. Household Electricity Demand Forecast Based on Context Information and User Daily Schedule Analysis From Meter Data [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 11(1): 33-43.
- [33] Bao W, Yue J, Rao Y. A deep learning framework for financial time series using stacked autoencoders and long-short term memory[J]. *Plos One*, 2017, 12(7): e0180944.
- [34] AECOM. Energy demand research project: Final analysis [R]. AECOM House, Hertfordshire, UK, 2011.