

# 复合轴辐式两阶段同城快递枢纽选址优化研究

李盈盈, 倪静

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年12月29日; 录用日期: 2024年3月6日; 发布日期: 2024年3月13日

## 摘要

针对同城快递枢纽选址问题, 考虑其容量限制、拥堵约束下, 以最小化成本为目标构建两阶段轴辐式网络优化模型。首先, 考虑辐点容量限制, 构建基于集覆盖模型的辐点选址优化模型, 引入Tent混沌、t分布变异算子等更新策略改进黏菌算法并进行求解, 得到辐点选址方案 and 对应需求点; 其次, 考虑轴点容量限制、轴点拥堵情况, 构建基于复合轴辐式网络的轴点选址优化模型, 采用郊狼算法进行求解, 得到轴点选址方案 and 对应辐点; 最后, 以某快递企业上海市同城快递网络为案例, 进行仿真实验分析, 仿真结果表明: 该模型和算法能够提高枢纽利用率、降低同城快递网络成本, 对同城快递枢纽选址问题具有一定的参考意义。

## 关键词

同城快递, 枢纽选址, 复合轴辐式网络, 黏菌算法, 郊狼算法

# Optimization of Two Stage Intra-City Express Hub Location Based on Hybrid Hub and Spoke Network

Yingying Li, Jing Ni

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Considering the constraints of capacity and congestion, a two-stage hub-and-spoke network optimization model was built to minimize the cost. Firstly, considering the capacity limit of the spokes, a spokes location optimization model based on set coverage model is constructed, and updating

strategies such as Tent chaos and T-distribution mutation operator are introduced to improve the slime mold algorithm (SMA) and solve it, and the spokes location scheme and corresponding demand points are obtained. Secondly, considering the capacity limitation and congestion of the hub, the hub location optimization model based on the hybrid hub and spoke network was constructed, and the coyote algorithm (COA) was used to solve the model to obtain the hub location scheme and the corresponding spoke. Finally, the simulation experiment is carried out by taking the intra-city express network of a Courier company in Shanghai as an example. The simulation results show that the model and algorithm can improve the utilization rate of the hub and reduce the cost of the intra-city express network, and has certain reference significance for the location of the intra-city express hub.

## Keywords

Intra-City Express Delivery, Hub Location, Hybrid Hub and Spoke Network, Slime Mold Algorithm, Coyote Algorithm

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

枢纽选址问题(hub location problem, HLP)是经典选址问题的延伸, 在现实生活中占据极其重要的地位, 甚至具有战略意义。基本枢纽选址问题分为 P-中位问题、P-中心问题和覆盖选址问题。航空、公共交通网络、快递、供应链管理和电信系统等领域的枢纽选址问题通常基于轴辐式网络理论开展后续研究。

O'Kelly [1]首次提出二次整数规划的通用枢纽选址模型, 将轴辐式网络应用于枢纽设施选址和网络设计模型上, 主要解决轴的位置以及辐的分派问题, 并指出该问题属于 NP-hard 问题。Helm [2]等设计了单分配无容量约束的轴辐式航空网络模型, 采用模拟退火算法进行求解, 研究表明该模型能够降低航空网络运输成本。Correia I [3]等对有容量约束的单分配轴辐式物流网络模型进行回顾, 并增加了新的约束条件, 减少了模型的计算时间。Camargo [4]等研究无容量限制的多分配轴辐式网络模型, 采用 Benders 分解方法解决交通拥堵严重时交通成本高的问题。赵晋[5]等构建允许辐点间直达的快递网络规划决策模型, 对比发现复合轴辐式网络比纯轴辐式网络更利于降低快递网络总成本、提高服务时效性。

以上文献多是解决单层级单阶段枢纽选址问题, 随着应用过程需求的复杂化, 国内外学者建立多层次多阶段轴辐式网络选址模型。Jaemin [6]等设计了一个具有两级枢纽的轴辐式网络选址模型, 最大限度地降低物流网络成本。李永竞[7]等提出一个考虑充电站建设成本的三阶段选址模型, 通过仿真验证了模型的有效性, 为充电站的科学选址分配问题提供了参考。Zhao [8]等结合城市地铁系统, 提出一个两级三阶段轴辐式结构的优化模型, 并论证适合上海地铁物流网络的选址布局方案, 结果表明多层次多阶段轴辐式网络选址模型, 能够提供合理的枢纽选址方案。

随着同城物流市场的快速扩张, 合理的快递枢纽布局尤为重要, 单层级单阶段轴辐式网络选址模型无法满足需求, 考虑多层次多阶段轴辐式网络选址模型有利于问题的求解。同时, 由于枢纽节点存在容量限制和拥堵概率, 必要时考虑开通辐点间直达链路以缓解枢纽处拥堵情况。为此, 针对同城快递枢纽选址问题, 结合点对点网络, 建立基于复合轴辐式网络的两阶段同城快递枢纽选址优化模型, 为同城快递枢纽选址问题提供合理的建议。第一阶段, 自“需求点”角度出发, 考虑辐点容量限制, 以成本最小为优化目标, 建立基于集覆盖模型的辐点选址优化模型, 并引入 Tent 混沌、t 分布变异算子等更新策略

改进黏菌算法(SMA)进行求解, 得到辐点选址方案 and 对应服务点; 第二阶段, 自“企业”角度出发, 考虑轴点容量限制, 轴点拥堵情况, 以成本最小为优化目标, 建立基于复合轴辐式的轴点选址优化模型, 采用郊狼算法(COA)进行求解, 得到轴点选址方案 and 对应辐点; 最终, 以上海市某快递企业同城快递网络为案例, 通过仿真实验验证模型和算法的有效性, 为同城快递枢纽合理选址提供一定的建议。

## 2. 模型构建

### 2.1. 问题描述

同城快递网络可由  $G=(N,A)$  表示, 其中  $N$  为所有节点的集合, 节点包括枢纽节点、转运中心和末端需求点;  $A$  为所有边的集合。利用现有趋于完善的快递网点, 满足研究区域内所有末端需求点, 得到合理的同城快递枢纽布局方案。为此, 本文将同城快递网络枢纽选址分为辐点选址阶段和轴点选址阶段: 第一阶段, 考虑辐点容量限制, 构建基于集覆盖模型的辐点选址优化模型, 得到辐点选址方案 and 对应需求量; 第二阶段, 考虑轴点容量限制且存在轴点拥堵情况, 允许部分辐点间开通直接连接链路, 构建基于复合轴辐式网络的轴点选址优化模型, 得到最终轴点选址方案 and 对应辐点。

### 2.2. 基于集覆盖模型的辐点选址模型

#### 2.2.1. 模型假设

为保证模型的可行性和有效性, 做出以下假设: 1) 辐点负责需求点包裹的收派件任务; 2) 每个需求点可以分配给已选择的一个辐点; 3) 辐点存在固定建设成本、容量限制; 4) 需求量根据地区人均快递包裹数和该地区常住人口进行估算; 5) 快递员每次只负责一个需求点的包裹取件, 各需求点取派件相互独立。

#### 2.2.2. 符号说明

集合:

$I$  为候选辐点集合, 索引为  $i$ ;

$L$  为需求点集合, 索引为  $l$ ;

参数:

$d_{il}$  为需求点到辐点的距离;

$f_q$  为辐点日均运行固定成本;

$q_{il}$  为需求点包裹件数;

$c_{il}$  为需求点到辐点间单位距离运输成本;

$g_i$  为辐点处的同城快递件均分拣成本;

$p'$  为选择的辐点数量;

$FQ_i$  为辐点  $i$  的最大容量, 即最大快递处理能力;

决策变量:

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{候选辐点被选为辐点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$z_{il} = \begin{cases} 1, & \text{需求点} l \text{ 被辐点} i \text{ 服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

#### 2.2.3. 模型建立

目标函数:

$$\min F_1 = \sum_{i \in N} \sum_{l \in N} c_{il} q_{il} d_{il} z_{il} z_i + \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} f_k z_i + \sum_{i \in N} \sum_{l \in N} g_i q_{il} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in N} z_i = p' \quad (2)$$

$$z_{il} \leq z_i \quad (3)$$

$$\sum_{i, l \in N} q_{il} z_{il} \leq FQ_k z_i \quad (4)$$

$$\sum_{i, l \in N} z_{il} \leq 1 \quad (5)$$

$$z_i, z_{il} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

目标函数式(1)表示需求点到辐点的运输成本、辐点处的固定运行成本、辐点处快递包裹分拣成本之和; 约束式(2)表示最终选择辐点的数量; 约束式(3)保证需求点只能接受已被选为辐点的服务。约束式(4)保证辐点处理包裹数量不会超过其最大包裹处理能力。约束式(5)保证每个需求点只能分配给一个辐点。约束式(6)表示决策变量。

### 2.3. 基于复合轴辐式网络的轴点选址模型

#### 2.3.1. 模型假设

为保证模型的可行性和有效性, 做出以下假设: 1) 轴点作为转运节点, 不负责快递的派取任务; 2) 每个辐点分配给一个轴点; 3) 辐点之间允许直接连接; 4) 轴点存在固定运行成本、容量限制; 5) 辐点间进行同城快递转运最多经历两个轴点; 6) 轴点之间为全连通网络。

#### 2.3.2. 符号说明

集合:

$I$  为候选辐点集合, 索引为  $i, j \in I$ ;

$M$  为候选轴点集合, 索引为  $m, k \in M$ ;

参数:

$q_{ij}$  为辐点  $i$  与辐点  $j$  之间包裹件数;

$c_{ij}$  为辐点  $i$  与辐点  $j$  直接连接单位距离运输成本;

$c_{km}$  为轴点  $k$  与轴点  $m$  之间单位距离运输成本;

$c_{ik}$  为辐点  $i$  与轴点  $k$  之间单位距离运输成本;

$d_{ij}$  为辐点  $i$  与辐点  $j$  之间运输距离;

$f_k$  为轴点处同城快递件均转运成本;

$f_k^H$  为轴点处运行固定成本;

$HQ_k$  为轴点  $k$  的最大容量, 即最大快递中转能力;

$q_{ij}^{km}$  为辐点  $i$  到辐点  $j$  在轴点  $k$  与轴点  $m$  之间运输的包裹件数;

$q_{ij}^{ik}$  为辐点  $i$  到辐点  $j$  在轴点  $k$  处转运的包裹件数;

$q_{ij}^{zd}$  为辐点  $i$  到辐点  $j$  直接运输的包裹件数;

$\tau_k$  为轴点处拥堵系数[9],  $\tau_k = (1 + \tau)^\beta$ :  $\tau$  为拥堵因子,  $\beta$  为轴点拥堵程度。考虑三种不同的拥堵程度, 70%、85%和 100%。随机生成一个  $\varphi \in [0, 1]$ , 表示轴点处中转拥堵概率,  $\varphi$  在 70% 以下,  $\beta = 0$ ,  $\tau_k = 1$ 。对于  $\varphi$  在 70% 到 85% 之间,  $\beta = 1$ ,  $\tau_k = 1 + \tau$ 。对于  $\varphi$  高于 85% 的情况,  $\tau_k = (1 + \tau)^2$ 。

$P$  为选择的轴点数量;

决策变量:

$$x_{kk} = \begin{cases} 1, & \text{候选轴点 } k \text{ 被选为轴点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{辐点 } i \text{ 被轴点 } k \text{ 服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{辐点 } i \text{ 到辐点 } j \text{ 存在直接链接} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu = \begin{cases} 0, & \text{辐点到辐点 } j \text{ 通过直接链路链接} \\ 1, & \text{辐点 } i \text{ 到辐点 } j \text{ 通过一个轴点转运} \\ 2, & \text{辐点 } i \text{ 到辐点 } j \text{ 通过两个轴点转运} \end{cases}$$

### 2.3.3. 模型建立

目标函数:

$$\min F_2 = \left( \sum_{i,j \in I} \sum_{k \in M} q_{ij}^{ik} c_{ik} d_{ik} + \sum_{i,j \in I} \sum_{m \in M} q_{ij}^{mj} c_{mj} d_{mj} \right) x_{ik} x_{mj} + \left( \sum_{i,j \in I} \sum_{k,m \in M} q_{ij}^{km} c_{km} d_{km} + \mu \sum_{i,j \in I} q_{ij}^{km} f_k \tau_k + \sum_{k \in M} f_k^H x_{kk} \right) x_{km} + \sum_{i,j \in I} q_{ij}^{zd} c_{ij} d_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

约束条件:

$$\sum_{k \in M} x_{kk} = P \quad (8)$$

$$x_{ik} + x_{ij} \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{k \in M} x_{ik} \leq 1 \quad (10)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad (11)$$

$$\sum_{k \in M} q_{ij} x_{ik} \leq HQ_k \quad (12)$$

$$x_{ij}, x_{mj}, x_{ik}, x_{kk} \leq 1 \quad (13)$$

目标函数式(7)表示包括从出发辐点  $i$  到轴点  $k$  运输成本, 轴点  $k$  和  $m$  间运输成本、轴点  $m$  到辐点  $j$  运输成本, 轴点固定运行成本、轴点处转运成本, 辐点  $i$  到辐点  $j$  直达运输成本之和; 约束式(8)表示最终选择辐点的数量; 约束式(9)确保要么通过直接链路, 要么通过轴点进行转运; 约束式(10)表示每个辐点最多分配给一个轴点; 约束式(11)表示未选为轴点不能向辐点提供服务; 约束式(12)保证轴点包裹的数量不会超过其最大处理能力; 约束式(13)表示决策变量。

## 3. 算法

### 3.1. 黏菌算法

黏菌算法(Slime Mould Algorithm, SMA), 于 2020 年 Li 等人[10]出的一种新型智能算法。SMA 算法模拟了黏菌在寻找食物过程中形态和行为的变化, 黏菌的行为主要包括三种: 接近食物、包裹食物和获取食物。

### 3.1.1. 接近食物

黏菌算法模拟了多头绒泡菌在觅食阶段寻找、包围食物的过程。黏菌的前端呈扇形, 后面是相互连接的静脉网络。当静脉接近食物时, 黏菌的生物振荡器会产生扩散波来改变静脉中细胞质的流动, 使黏菌向更好的食物移动。黏菌在接近食物阶段的位置更新公式为:

$$X(t+1) = \begin{cases} X_b(t) + v_b \cdot (W \cdot X_A(t)), & r < p \\ v_c \cdot X(t), & r \geq p \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $X_b(t)$  表示个体目前发现的最优解位置,  $v_b$  是范围为  $[-a, a]$  的随机数,  $W$  是黏菌的权重系数,  $X_A(t)$  和  $X_B(t)$  表示从黏菌中随机选取的两个个体的位置,  $v_c$  是在  $[-1, 1]$  内震荡并最终趋于零的参数,  $r$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

参数  $p$ 、参数  $a$  和权重系数  $W$  的更新公式分别为:

$$p = \tanh |S(i) - F_D| \quad (15)$$

$$\alpha = \arctan h \left( -\frac{t}{T} + 1 \right) \quad (16)$$

$$W(\text{smellIndex}(i)) = \begin{cases} 1 + r_1 \log \left( \frac{F_b - S(i)}{F_b - F_w} + 1 \right), & i < \frac{N}{2} \\ 1 - r_1 \log \left( \frac{F_b - S(i)}{F_b - F_w} + 1 \right), & i \geq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{smellIndex}(i) = \text{sort}(S) \quad (18)$$

其中,  $N$  为种群规模,  $i = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $S(i)$  表示第  $i$  个黏菌个体的适应度,  $F_D$  表示当前迭代下黏菌的最佳适应度,  $t$  为当前迭代次数,  $T$  为最大迭代次数,  $F_b$  为当前迭代的最佳适应度,  $F_w$  为当前迭代的最差适应度,  $i < \frac{N}{2}$  表示  $S(i)$  排名前一半的黏菌个体,  $\text{sort}(S)$  表示对黏菌个体适应度值的排序序列。

### 3.1.2. 包裹食物

包裹阶段是模拟黏菌静脉结构内的收缩方法, 位置根据食物质量进行调整, 食物浓度越高, 区域权重越大, 位置更新公式如下:

$$X = \begin{cases} \text{rand} \cdot (U_B - L_B) + L_B, & \text{rand} < z \\ X_b(t) + v_b (W \cdot X_A(t) - X_B(t)), & \text{rand} \geq z \text{ 且 } r < p \\ v_c \cdot X(t), & r \geq p \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\text{rand}$  是  $[0, 1]$  的随机值,  $U_B$  和  $L_B$  表示搜索空间的上界和下届,  $z$  是切换概率, 其余参数同上。

### 3.1.3. 获取食物

黏菌主要依靠生物振荡器产生的波调整静脉中的细胞质流动, 使其处于食物浓度较高的位置, 通过参数  $W$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  模拟黏菌的振荡变化。  $W$  模拟不同食物浓度下的振荡频率, 黏菌根据发现食物浓度的不同从而调整接近食物的速度, 当食物浓度较低时, 黏菌接近食物的速度较慢, 可以提高黏菌选择最佳食物源的效率。  $v_b$  在  $[-a, a]$  内并且随着迭代次数的增加逐渐接近零。  $v_c$  在  $[-1, 1]$  之间振荡并且逐渐趋于零。  $v_b$  和  $v_c$  之间的协同作用模拟黏菌的选择行为, 使得黏菌搜索食物更具全面性。

## 3.2. 改进的黏菌算法

黏菌算法作为一种新型智能算法, 具有参数少、模型简单、扩展性和寻优能力强于传统智能优化算

法的特点, 目前已应用于工程优化[11]、参数估计[12]等领域。依然存在寻优精度低、收敛速度慢及易陷入局部最优的不足。因此尝试引入 tent 混沌、t 分布变异算子等改进策略来改进基础的黏菌算法。

### 3.2.1. Tent 混沌

黏菌进行更新位置的时候, 一般选择当前最优位置进行更新, 会出现搜索范围小的情况。为提高搜索效率, 选择对当前最优位置添加一个扰动, 并对位置信息进行贪婪策略判断, 判断当前位置是否最优。本文利用混沌运动的随机性、规律性和遍历性, 产生丰富多样的种群。当  $rand < z$  时, 通过 Tent 混沌映射得到  $X^*$ , Tent 混沌映射表达式为:

$$X^* = \begin{cases} 2X_t, & 0 \leq X_t < \frac{1}{2} \\ 2(1 - X_t), & \frac{1}{2} \leq X_t \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $t$  表示映射次数;  $X_t$  表示第  $t$  次映射函数值。

采取贪婪策略进行判断是否保留结果, 贪婪策略表达式为:

$$X^* = \begin{cases} X_t^*, f(X_t^*) < f(X_t) \\ X_t, f(X_t^*) \geq f(X_t) \end{cases} \quad (21)$$

### 3.2.2. t 分布变异算子

当  $r < p$  时, 采用  $t$  分布变异算子  $t(iter)$  进行位置扰动, 改进迭代过程中黏菌的搜索位置。

$$X^* = X_b(t) + v_b(W \cdot X_A(t) - X_B(t)) \cdot t(iter), r < p \quad (22)$$

当  $r \geq p$  时, 加入新的位置更新策略, 表达式如下:

$$X^* = \begin{cases} v_c \cdot X(t), & rand < \frac{1}{2} \\ X_b(t) + rand(X_A(t) - X_b(t)), & rand \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (23)$$

## 3.3. 郊狼优化算法

郊狼优化算法(coyote optimization algorithm, COA)是由 Juliano 于 2018 年提出的一种全局优化算法, 通过模拟郊狼出生、成长、死亡和迁徙行为, 包括初始化种群、郊狼的成长、郊狼的生死以及驱逐和接纳 4 个步骤[13]。每一个郊狼代表问题的一个候选解, 每个解向量由郊狼的社会状态因子构成, 用郊狼的社会适应能力来评价每个候选解向量的质量。

### 3.3.1. 初始化郊狼种群并随机分组

总郊狼数量为  $N$ , 分成  $N_p$  个组群, 每组有  $N_c$  个郊狼。第  $p$  组第  $c$  个郊狼在第  $j$  维的初始位置  $s_j$  并计算每个郊狼的社会适应度值  $F$ :

$$s_j = r_j(u_j - l_j) + l_j \quad (24)$$

$$F = fit(s_j) \quad (25)$$

其中,  $r_j$  为 [0, 1] 内均匀分布的随机数;  $u_j$ 、 $l_j$  为第  $j$  维状态因子的上下界,  $j = 1, 2, \dots, D$ ;  $D$  为初始设置搜索空间维度。

### 3.3.2. 组内郊狼的成长

寻找组内郊狼文化趋势计算式:  $c_j = \text{median}(A_j)$ , 其中  $A_j$  为  $N_c$  行  $D$  列的矩阵, 表示组内的  $N_c$  个解向量;  $j$  为第  $j$  维状态因子;  $\text{median}()$  为取中位数。计算最优郊狼(头狼)  $\alpha$  和随机郊狼  $T_1$  的差异  $\delta_1$ ; 组内文化趋势  $\phi$  和随机郊狼  $T_2$  差异  $\delta_2$ 。组内郊狼成长与  $\delta_1$  与  $\delta_2$  有关:

$$\delta_1 = \alpha - s_{T_1} \quad (26)$$

$$\delta_2 = \phi - s_{T_2} \quad (27)$$

$$s_k = s_k + c_1 \delta_1 + c_2 \delta_2 \quad (28)$$

其中,  $s_k$  是组内第  $k$  只头狼成长获得的新解;  $c_1$  和  $c_2$  为  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数。

每只头狼成长后, 对新个体计算社会适应能力, 采用迭代贪心算法进行优胜劣汰, 保留更优郊狼参与组内其余郊狼成长。

### 3.3.3. 郊狼的生与死

组内郊狼成长后, 产生一只新的幼狼, 幼狼的产生受随机选择父母郊狼的遗传和环境因素影响:

$$pup_j = \begin{cases} s_{T_1,j}, \rho_j < p_s \text{ 或 } r_j = j_1 \\ s_{T_2,j}, \rho_j \geq p_s + p_a \text{ 或 } r_j = j_2 \\ R_j, \text{ 其他} \end{cases} \quad (29)$$

其中,  $pup_j$  为幼狼的第  $j$  维度;  $\rho_j$  为  $[0,1]$  内均匀分布的随机数;  $j_1$  和  $j_2$  是幼狼随机的两个维度;  $R_j$  为第  $j$  维决策变量在限制范围内随机产生的变异值;  $p_s$  和  $p_a$  分别为分散概率和关联概率。

$$p_s = \frac{1}{D} \quad (30)$$

$$p_a = (1 - p_s) / 2 \quad (31)$$

每出生一只新生郊狼, 就会有一只郊狼淘汰。郊狼生死的规则如下: 1) 新生郊狼的适应能力最弱, 则新生郊狼直接淘汰; 2) 组内有一只郊狼比新生郊狼适应度值差, 适应度值最差的郊狼淘汰; 3) 组内有多只郊狼的适应度值比新生郊狼的适应度值差, 淘汰年龄最大的郊狼。

### 3.3.4. 郊狼的驱逐与接纳

为保证郊狼组之间的信息共享和种群的多样性, 郊狼被驱逐出原本所属的组群概率为  $p_e = 0.005 * N_c^2$ ,  $N_c \leq 14$ 。

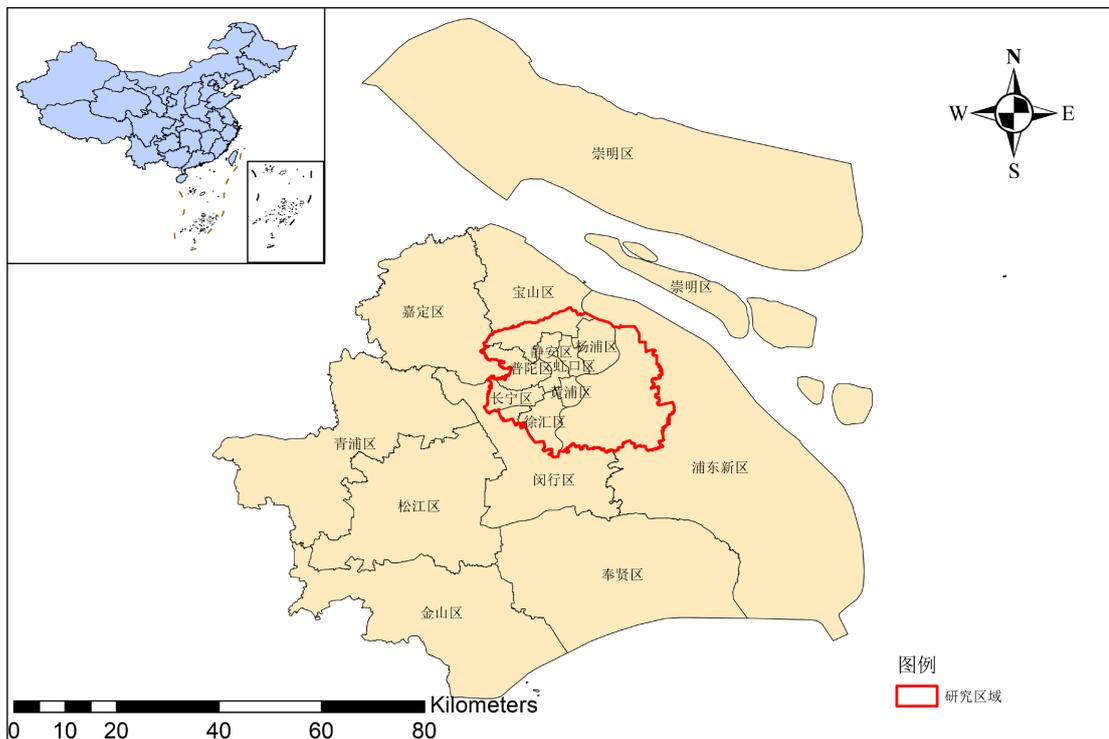
## 4. 算例分析

### 4.1. 数据来源

为验证模型的有效性, 选取上海市某快递企业同城快递网络作为仿真对象。根据上海市统计局数据, 第七次人口普查上海市常住人口为 2487.09 万。根据上海市邮政管理局数据, 上海市 2021 年 1~12 月同城快递业务总量为 82632.8 万件。

一年按照 365 天计算, 计算出每日人均的同城快递量为 0.09 件。如图 1 和图 2 所示, 选取上海市主要城区 466 km<sup>2</sup> 作为研究区域, 选取区域内共计 366 个居住点作为需求点集合 [8], 部分需求点坐标信息及需求量见附录 1。根据人口数据与每日人均快递量乘积得到每个需求点的同城快递需求量。

爬取 POI 数据, 获取主城区某公司营业点(店)作为候选辐点集合(编号 FD01-FD58), 候选辐点坐标信息见附录 2; 获取主城区转运中心作为候选轴点集合(编号 ZD01-ZD39), 候选轴点坐标信息见附录 3。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2022)4312号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Schematic diagram of the research area

图 1. 研究区域示意图

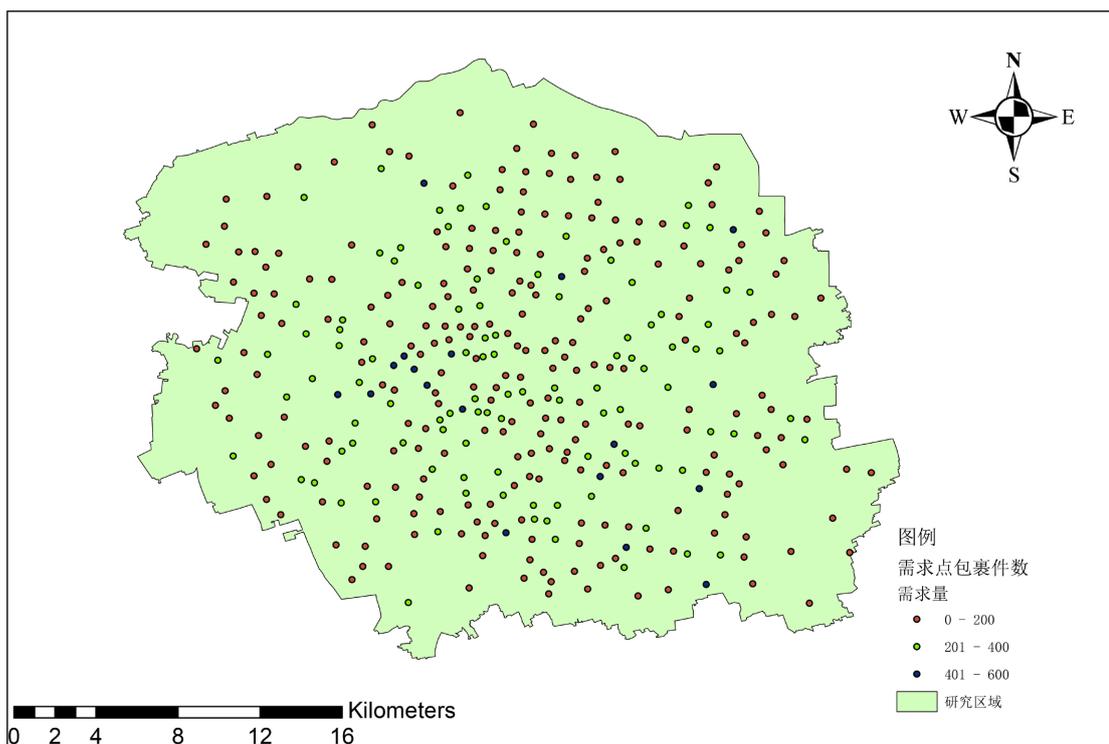


Figure 2. Distribution map of demand points

图 2. 需求点分布图

## 4.2. 参数设置

参考文献[14] [15] [16]并使用部分折算设置参数: 辐点固定运营成本  $f_q = 1000$ 元/天; 需求点至辐点单位距离运输成本  $c_{il} = 1.0$ 元/件次·公里; 辐点处单位分拣成本  $g_i = 0.65$ 元/件次; 辐点处容量限制  $FQ_i = 8000$ 件次/日; 轴点固定运营成本  $f_k^H = 5000$ 元/天; 轴点间单位距离运输成本为  $c_{km} = 0.04$ 元/件次·公里; 辐点至轴点间单位距离运输成本  $c_{ik} = 0.1$ 元/件次·公里; 辐点间直接连接的单位距离运输成本  $c_{ij} = 0.5$ 元/件次·公里。轴点处单位转运成本  $f_k = 0.51$ 元/件次; 轴点处容量限制  $HQ_k = 25000$ 件次/日。

采用 MATLAB R2016a 软件编写, 实验环境为 Windows 11, 处理器为 Intel Core i5-12500H CPU @ 2.50 GHz 和 16GB RAM。SMA 算法种群数量为 90, 迭代次数为 500。COA 算法种群数量为 80, 发现者比例为 0.7, 郊狼组为 10, 迭代次数为 200。

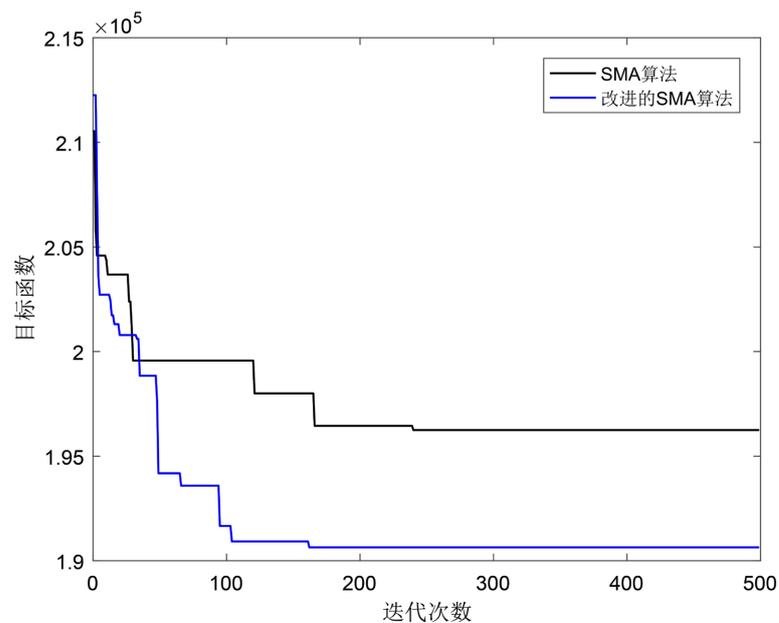
## 4.3. 仿真结果

**第一阶段:** 首先使用 SMA 算法求解基于集覆盖的辐点选址模型, 在满足辐点包裹服务能力的情况下覆盖全部需求点, 选择的辐点数量[14]  $p' = \sqrt{N}$ , 四舍五入取整数, 选择  $p' = 20$  个辐点服务 366 个需求点。SMA 算法 SMA 算法对比结果如表 1 所示, 适应度函数的收敛曲线如图 3 所示: SMA 算法约在第 250 次迭代收敛, 平均用时 110 s; 改进的 SMA 算法约在第 110 次迭代收敛, 平均用时 89 s。改进的 SMA 算法收敛速度加快且成本降低 4%。

**Table 1.** Comparison of SMA algorithm results

**表 1.** SMA 算法结果对比

算法名称	成本 $F_1$ /元	用时/s	优化对比
SMA 算法	196696	110	4.0%
改进的 SMA 算法	188808	89	



**Figure 3.** Convergence curve of SMA algorithm fitness function

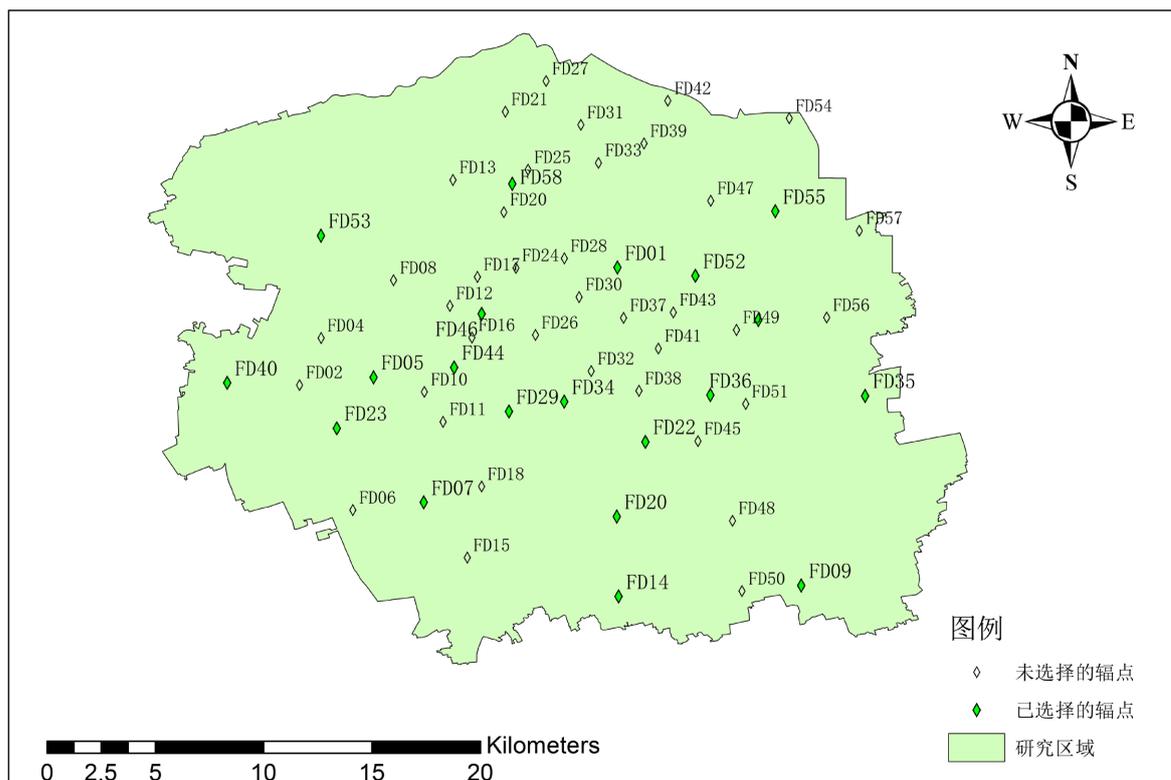
**图 3.** SMA 算法适应度函数的收敛曲线

$p' = 20$  第一阶段最终选择的辐点、对应服务量(包裹量)如表 2 和图 4 所示。

**Table 2.** Selected spokes and corresponding service volume

**表 2.** 选择的辐点以及对应服务量

辐点编号	服务量/件次	辐点编号	服务量/件次
FD01	3811	FD34	3553
FD03	2781	FD35	2080
FD05	3904	FD36	3991
FD07	3165	FD40	724
FD09	2507	FD44	3195
FD14	1387	FD46	5832
FD20	4689	FD52	2154
FD22	3349	FD53	2517
FD23	2868	FD55	3350
FD29	4317	FD58	5310



**Figure 4.** Distribution map of spoke location

**图 4.** 辐点选址分布图

**第二阶段:** 根据第一阶段得到的辐点选址方案 and 对应服务量, 生成辐点间同城快递包裹矩阵, 作为辐点间日均包裹流量, 部分轴点间同城快递包裹矩阵如表 3。采用 COA 算法求解基于复合轴辐式网络的轴点选址模型, 在满足轴点容量约束的情况下, 选取不同个数的轴点比较成本变化。如表 4, 对比不同轴点个数下实验结果, 随着轴点个数的增加, 轴点间规模经济效益增大, 运输成本降低, 轴点处理成本增加,  $p = 7$  时基于复合轴辐式网络的轴点选址成本达到最优, 收敛曲线见图 5, 选择轴点编号为 ZD08、

ZD11、ZD13、ZD18、ZD23、ZD27、ZD35 为最终方案, 并且建议开通编号 FD44 至 FD29、FD29 至 FD54 和 FD01 至 FD52 三条直达链路, 如表 5 和表 6。对应轴点选址方案和直接链路方案分布图如图 6:

**Table 3.** Number of intra-city express packages between spokes

**表 3.** 部分辐点间同城快递包裹数

编号	FD01	FD03	FD05	FD07	FD09	FD14	FD20	FD22	FD23	FD29
FD01	0	350	37	9	352	47	319	69	15	187
FD03	57	0	13	98	81	236	179	101	146	160
FD05	252	461	0	106	48	192	197	446	73	232
FD07	6	56	298	0	147	62	82	107	128	99
FD09	89	267	54	22	0	123	143	128	77	245
FD14	91	79	82	95	72	0	73	70	18	49
FD20	426	378	157	377	154	330	0	106	473	343
FD22	110	201	71	291	169	213	45	0	272	201
FD23	109	162	272	178	62	268	51	127	0	260
FD29	382	422	240	266	325	123	52	200	300	0

**Table 4.** Comparison of results for different number hub

**表 4.** 不同个数的轴点结果对比

轴点个数	总成本/元	运输成本/元	直达成本/元	处理成本/元	固定成本/元
P = 6	171,468	72,960	2430	68,507	30,000
P = 7	165,901	63,221	1141	67,680	35,000
P = 8	170,887	60,710	877	70,177	40,000
P = 9	175,594	58,967	730	71,627	45,000
P = 10	179,194	58,647	1032	70,546	50,000

**Table 5.** Hub location scheme when  $p = 7$

**表 5.**  $p = 7$  时轴点选址方案

序号	转运中心轴点编号	对应服务辐点编号
1	ZD08	FD05/FD07/FD24/FD41
2	ZD11	FD45/FD47
3	ZD13	FD54/FD59
4	ZD18	FD30/FD35
5	ZD23	FD09/FD14/FD20
6	ZD27	FD23/FD37
7	ZD35	FD03/FD36/FD53/FD59

**Table 6.** Spoke direct connection scheme

**表 6.** 辐点直接连接方案

序号	(出发/目的)辐点编号	(出发/目的)辐点编号
1	FD44	FD29
2	FD29	FD34
3	FD01	FD52

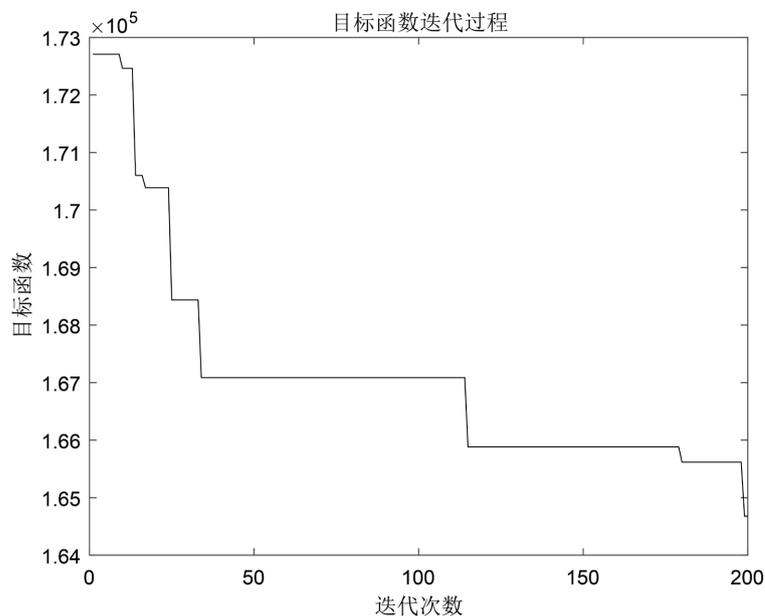


Figure 5. Convergence curve of COA algorithm fitness function  
图 5. COA 算法适应度函数的收敛曲线

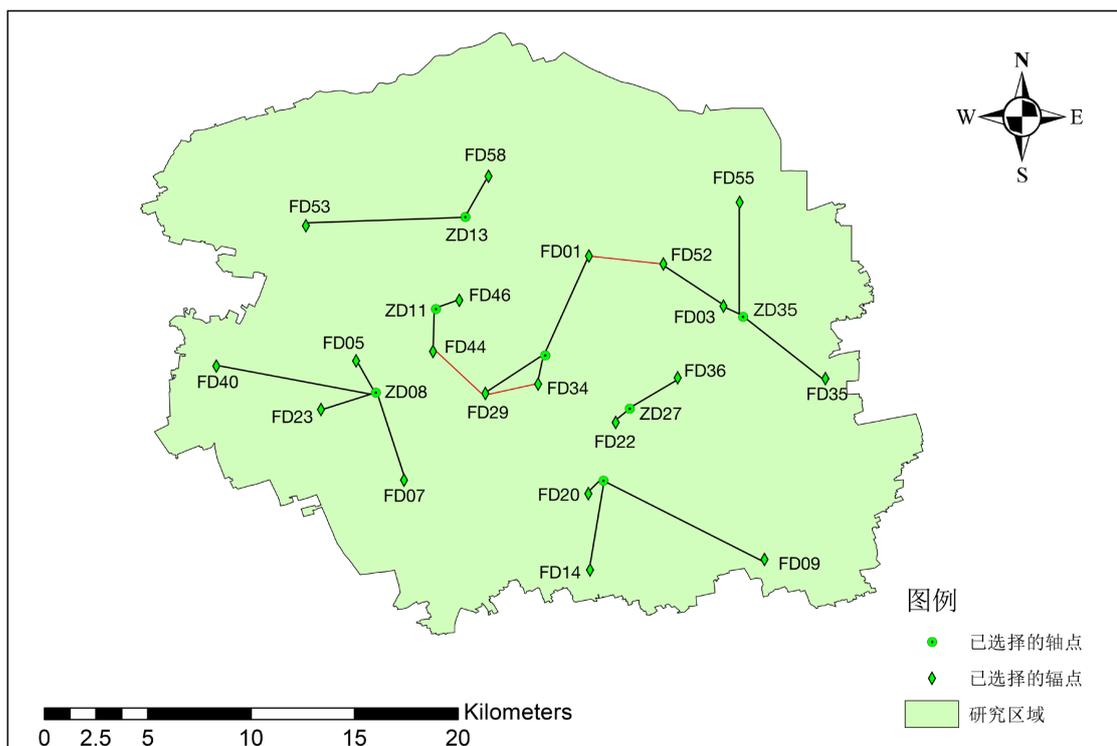


Figure 6. Hub location and spoke direct link scheme when  $p = 7$   
图 6.  $p = 7$  轴点选址方案和直接链路方案

方案对比: 与基于纯轴辐网络的轴点选址方案对比, 结果如表 7 所示: 相比纯轴辐网络选址方案, 基于复合轴辐式网络的轴点选址方案除了运输成本增加-0.4%, 总成本优化了 4.4%, 轴点固定成本优化了 12.5%, 轴点中转处理成本优化了 6.2%, 轴点的平均利用率提高 9.3%。相比于直达式物流网络, 总成

本 = 辐点间平均距离\*单位距离运输成本\*包裹总数, 辐点间平均距离 11.88 km, 单位距离运输成本参考公路单位运输成本 0.45 元/件次·公里, 包裹总数为 65484 件, 则直通式物流网络运输成本 =  $11.88 \times 0.45 \times 65484 = 350077$  元, 成本优化了 52.6%。结果表明: 基于复合轴辐式网络的轴点选址模型, 在考虑容量限制的同时, 减少分拣成本和轴点固定成本, 并且提高轴点平均利用率。

**Table 7.** Different hub location scheme comparison  
**表 7.** 不同轴点选址方案对比

优化要素	基于混合轴辐式网络轴点选址方案	基于纯轴辐网络轴点选址方案	优化对比
最优方案轴点个数	7	8	-
最优方案轴点选址	ZD08/ZD11/ZD13/ZD18/ ZD23/ZD27/ZD35	ZD08/ZD11/ZD11/ZD13/ ZD18/ZD23/ZD27/ZD32	-
总成本/元	165901	173995	4.4%
运输成本/元	63221	62963	-0.4%
轴点固定成本/元	35000	40000	12.5%
轴点中转处理成本/元	67680	72137	6.2%
辐点间直达链路	3	-	-
轴点平均利用率	74.8%	65.5%	9.3%

## 5. 结论

电商蓬勃发展, 同城物流市场快速扩张, 同城快递需求与日俱增, 合理的快递枢纽布局尤为重要。同时, 由于快递枢纽节点存在容量限制和一定的拥堵概率, 必要时考虑开通辐点间直达链路以缓解枢纽处拥堵情况。对此, 本文建立了复合轴辐式两阶段同城快递枢纽选择模型, 旨在对同城快递枢纽选址提供合理建议。第一阶段, 自顾客“需求点”角度出发, 考虑辐点容量和固定运行成本, 以最小运行成本为优化目标, 基于集覆盖问题建立辐点选址模型, 加入 tent 混沌、t 分布变异算子等改进策略改进 SMA 算法并进行求解, 得到辐点选址方案 and 对应需求点。第二阶段, 自快递“企业”角度出发, 考虑轴点容量和固定运行成本, 允许辐点之间直接链路连接, 以最小运行成本为优化目标, 基于复合轴辐式网络建立轴点选址模型, 采用 COA 算法进行求解, 得到轴点选址方案 and 对应辐点。算例仿真模拟部分, 以上海市某快递企业为例, 最终优化成本 4%, 提高轴点平均利用率 9.3%, 验证了模型和算法的有效性。此外, 研究存在一些不足之处。在构建复合轴辐式两阶段同城快递选址模型时, 需求点包裹量采用日均同城快递包裹数与常住人口数量进行计算, 没有考虑到需求不确定的情况。未来的研究可以针对同城快递包裹数量进行需求预测, 或者考虑不确定需求情况下同城快递网络枢纽选址问题。

## 基金项目

国家自然科学基金(72174121)。

## 参考文献

- [1] O’Kelly, M.E. and Lao, Y. (1991) Mode Choice in a Hub-and-Spoke Network: A Zero-One Linear Programming Approach. *Geographical Analysis*, **23**, 283-297. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1991.tb00240.x>
- [2] Abdinnour-Helm, S. (2001) Using Simulated Annealing to Solve the p-Hub Median Problem. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **31**, 203-220. <https://doi.org/10.1108/09600030110389532>
- [3] Correia, I., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2010) The Capacitated Single-Allocation Hub Location Problem Revisited: A Note on a Classical Formulation. *European Journal of Operational Research*, **207**, 92-96.

- <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.04.015>
- [4] de Camargo, R.S., Miranda Jr., G., Ferreira, R.P.M., *et al.* (2009) Multiple Allocation Hub-and-Spoke Network Design under Hub Congestion. *Computers & Operations Research*, **36**, 3097-3106. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.10.004>
- [5] 赵晋, 张建军, 严蔡华. 允许直达的混合轴辐式快递网络规划模型与算法研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(11): 58-65.
- [6] Hwang, J., Lee, J.S., Kho, S.Y., *et al.* (2018) Hierarchical Hub Location Problem for Freight Network Design. *IET Intelligent Transport Systems*, **12**, 1062-1070. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5289>
- [7] 李永竞, 裴文卉. 基于多源数据的充电站三阶段选址优化决策[J]. 控制工程, 2023, 30(9): 1648-1657. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210638>
- [8] Zhao, L., Zhou, J., Li, H., *et al.* (2021) Optimizing the Design of an Intra-City Metro Logistics System Based on a Hub-and-Spoke Network Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article ID: 104086. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104086>
- [9] Alumur, S.A., Nickel, S., Rohrbeck, B., *et al.* (2018) Modeling Congestion and Service Time in Hub Location Problems. *Applied Mathematical Modelling*, **55**, 13-32. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.10.033>
- [10] Li, S., Chen, H., Wang, M., *et al.* (2020) Slime Mould Algorithm: A New Method for Stochastic Optimization. *Future Generation Computer Systems*, **111**, 300-323. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>
- [11] 刘宇淞, 刘升. 无迹西格玛点引导的拟反向黏菌算法及其工程应用[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2709-2716. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2022.02.0055>
- [12] Mostafa, M., Rezk, H., Aly, M., *et al.* (2020) A New Strategy Based on Slime Mould Algorithm to Extract the Optimal Model Parameters of Solar PV Panel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **42**, Article ID: 100849. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100849>
- [13] Pierzan, J. and Coelho, L.D.S. (2018) Coyote Optimization Algorithm: A New Metaheuristic for Global Optimization Problems. 2018 *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Rio de Janeiro, 8-13 July 2018, 1-8. <https://doi.org/10.1109/CEC.2018.8477769>
- [14] 周洋. 某快递公司同城快递网络设计研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.002501>
- [15] 刘雨. 考虑多周期运输任务的快递服务网络优化设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021. <https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2020.002804>
- [16] 刘琰. 基于多种运输方式的快递网络优化问题研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.

**附录 1**

序号	经度	纬度	需求量/件次
1	121.6397	31.1494	238
2	121.6383	31.1860	156
3	121.6322	31.1645	37
4	121.6270	31.2610	97
5	121.6220	31.1272	84
6	121.6210	31.2078	77
7	121.6200	31.1989	321
8	121.6157	31.2530	181
9	121.6139	31.1498	160
10	121.6138	31.2082	221
11	121.6109	31.2775	107
12	121.6104	31.1880	92
13	121.6096	31.1998	165
14	121.6073	31.2716	106
15	121.6053	31.2539	154
16	121.6052	31.2121	96
17	121.6032	31.1945	47
18	121.6030	31.2897	109
19	121.6013	31.2184	128
20	121.6000	31.2991	128
21	121.5993	31.2007	167
22	121.5974	31.2504	144
23	121.5972	31.1357	37
24	121.5960	31.2636	239
25	121.5943	31.1563	111
26	121.5936	31.2413	172
27	121.5933	31.1475	156
28	121.5923	31.2845	97
29	121.5912	31.1796	133
30	121.5911	31.2775	159

## 附录 2

编号	经度	纬度
FD01	121.3544	31.2203
FD02	121.3844	31.2195
FD03	121.3933	31.2818
FD04	121.3933	31.2392
FD05	121.3999	31.2014
FD06	121.4065	31.1672
FD07	121.4152	31.2227
FD08	121.4234	31.2631
FD09	121.4360	31.1704
FD10	121.4362	31.2165
FD11	121.4439	31.2041
FD12	121.4468	31.2525
FD13	121.4481	31.3051
FD14	121.4487	31.2268
FD15	121.4539	31.1475
FD16	121.4560	31.2393
FD17	121.4582	31.2645
FD18	121.4598	31.1771
FD19	121.4600	31.2492
FD20	121.4692	31.2917
FD21	121.4697	31.3336
FD22	121.4713	31.2084
FD23	121.4728	31.3035
FD24	121.4742	31.2683
FD25	121.4792	31.3094
FD26	121.4822	31.2403
FD27	121.4867	31.3463
FD28	121.4943	31.2723
FD29	121.4943	31.2125
FD30	121.5004	31.2562
FD31	121.5011	31.3281
FD32	121.5055	31.2252
FD33	121.5085	31.3122
FD34	121.5161	31.1645

续表

FD35	121.5164	31.2685
FD36	121.5169	31.1311
FD37	121.5189	31.2475
FD38	121.5252	31.2170
FD39	121.5274	31.3203
FD40	121.5280	31.1958
FD41	121.5334	31.2346
FD42	121.5373	31.3380
FD43	121.5396	31.2498
FD44	121.5487	31.2650
FD45	121.5497	31.1960
FD46	121.5549	31.2152
FD47	121.5551	31.2963
FD48	121.5641	31.1628
FD49	121.5658	31.2425
FD50	121.5681	31.1334
FD51	121.5695	31.2115
FD52	121.5749	31.2466
FD53	121.5819	31.2919
FD54	121.5876	31.3307
FD55	121.5927	31.1358
FD56	121.6032	31.2476
FD57	121.6168	31.2839
FD58	121.6193	31.2150

### 附录 3

编号	经度	纬度
ZD01	121.3675	31.2073
ZD02	121.3780	31.2343
ZD03	121.3810	31.2572
ZD04	121.4087	31.2866
ZD05	121.4122	31.1852
ZD06	121.4163	31.3050
ZD07	121.4233	31.2705
ZD08	121.4236	31.2087
ZD09	121.4345	31.2834

续表

---

ZD10	121.4379	31.1872
ZD11	121.4498	31.2452
ZD12	121.4557	31.1786
ZD13	121.4627	31.2856
ZD14	121.4665	31.2555
ZD15	121.4734	31.1648
ZD16	121.4907	31.2514
ZD17	121.4969	31.1701
ZD18	121.4973	31.2250
ZD19	121.5000	31.2991
ZD20	121.5005	31.1448
ZD21	121.5109	31.1602
ZD22	121.5183	31.2305
ZD23	121.5227	31.1702
ZD24	121.5245	31.1993
ZD25	121.5273	31.2887
ZD27	121.5308	31.3000
ZD28	121.5341	31.2016
ZD29	121.5416	31.2310
ZD30	121.5531	31.3118
ZD31	121.5572	31.2269
ZD32	121.5579	31.1958
ZD33	121.5683	31.2817
ZD34	121.5771	31.1830
ZD35	121.5815	31.1739
ZD36	121.5833	31.2418
ZD37	121.5836	31.1893
ZD38	121.5849	31.2672
ZD39	121.6082	31.2125

---