



运筹与管理  
*Operations Research and Management Science*  
ISSN 1007-3221, CN 34-1133/G3

## 《运筹与管理》网络首发论文

题目: 疫情防控视角下多层次储备库协同选址及物流配送研究  
作者: 李昌兵, 李小倩, 曹帅, 杨兴旺  
收稿日期: 2021-01-03  
网络首发日期: 2022-01-26  
引用格式: 李昌兵, 李小倩, 曹帅, 杨兴旺. 疫情防控视角下多层次储备库协同选址及物流配送研究[J/OL]. 运筹与管理.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1133.G3.20220124.1933.010.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 疫情防控视角下多层级储备库协同选址及物流配送研究

李昌兵\*, 李小倩, 曹帅, 杨兴旺

(重庆邮电大学经济管理学院, 重庆, 400065)

**摘要:**建立包含多层级储备库协同选址及物流配送的应急响应决策模型,以应对突发公共卫生事件应急救援物资需求的不确定性、动态变化等特性。该决策模型将应急响应时间划分为多个连续的决策阶段,每一阶段包含疫情扩散行为预测、多层级储备库协同选址、物资需求配送、需求确定及参数调整。其中,多层级储备库选址模型以物资储备库、临时分拨中心及应急配送点三级运输之间的距离最小化为目标。以2019年“COVID-19”疫情下的武汉市为背景,设计算法框架对多层级储备库选址及物流配送问题进行求解。实验结果表明,本文选址及配送方案对应急救援效率具有较大提升,应急响应决策模型能为公共卫生事件应急管理提供良好的决策建议。

**关键词:**协同选址; 应急物流; 选址模型; 多层级储备库

中图分类号: C931.1 文章标识码: A

## Research on Collaborative Site Selection and Logistics Distribution of Multi-level Storage Warehouses from the Perspective of Epidemic Prevention and Control

Li Changbing, Li Xiaoqian, Cao Shuai, Yang Xingwang

(School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Due to the various of factors in emergency relief materials for public health emergencies, such as uncertainty of demand, dynamic changes and etc., in this study, we construct an emergency response decision-making model, which includes coordinated location selection of multi-level storage and logistics distribution. The model divides the emergency response time into multiple consequent decision-making stages. There are four parts in each stage, i.e., prediction of epidemic spread behavior, coordinated location selection of multi-level storage warehouses, material demand distribution, and data update and parameter adjustment. The coordination between the three-level transportation of the material storage warehouse, the temporary distribution center and the emergency distribution point are taken into account in the location of the multi-level storage warehouse. And an optimization model with the goal of minimizing the distance of the three-level transportation network is established. Taking the COVID-19 epidemic in 2019 in Wuhan as the background, genetic

收稿日期: 2021-01-03

\*作者简介: 李昌兵(1970—), 男, 四川人, 博士, 教授, 研究方向:供应链管理及优化。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60905066, F030707);

algorithms are used to solve the location of multi-level storage warehouses. And to verify the logistics and distribution problems, the simulated annealing algorithms are used. The experimental results show that the site selection and distribution plan can improve the efficiency of emergency rescue. And the emergency response decision-making model can provide good decision-making suggestions for the emergency management of public health incidents.

**Key words:** collaborative location; emergency logistics; location model; multi-level storage

## 0 引言

各类大规模极具传染性的突发公共卫生事件一直都备受关注,特别是2019年底突发的“COVID-19”,对全球人类生命安全、经济发展等各方面造成了巨大影响。突发公共卫生事件成因的多样性、传播的广泛性和危害的复杂性等特点要求突发公共卫生事件发生后,快速反应,高效决策<sup>[1]</sup>。公共卫生事件发生后,快速启动应急救援的前提是构建一个系统的适应突发公共卫生事件的应急物流响应方案。基于协同视角制定应急响应策略能够充分发挥临时分拨中心在应急物流响应阶段的能动性,从而提升应急物流响应效率。协同理论最早由 Herman Haken 于 1976 年提出,主要通过复杂系统内不同属性的子系统相互作用和协作,使复杂系统在时间、空间或功能上实现连续性的协调,从而创造出一加一大于二的整体效应<sup>[2]</sup>。

协同视角下对应急物流响应策略的研究主要包括应急救援过程中的多区域跨区域协同,多阶段协同以及多信息主体下的协同。根据突发事件后应急救援力量的不均衡性,康凯等提出多层级区域应急救援力量调度协同调度模型<sup>[3]</sup>。针对震后救灾物资的急迫性程度,郑斌等建立了双层规划的应急物资调度模型,上层以时间满意度为目标,下层则以物资分配公平性为目标<sup>[4]</sup>。Liu 等考虑大规模的灾害建立随机机会约束模型并运用实际数据集进行求解<sup>[5]</sup>。在以上针对多区域跨区域协同的研究中,忽略了突发公共卫生事件物资需求的不确定性以及暴发时间连续性。

考虑到突发疫情的不确定性和连续性,刘明等将应急响应时间划分为多个连续周期,并构建了复杂情景下多周期多疫区的应急物资调度模型<sup>[6,7]</sup>。葛洪磊等基于区域灾害系统理论建立了两阶段随机规划多目标模型<sup>[8,9]</sup>。Zhang 等基于条件概率情景定义主次灾害之间的相关性,并建立以时间、成本作为目标的随机规划模型<sup>[10]</sup>。这些研究虽然考虑了突发公共卫生事件物资需求的不确定性,然而对多层级应急区域之间协同缺乏思考。

由于应急物流服务过程多变,伤员救援、物资调配和灾民疏散 3 种活动之间协同影响,从而使得集成模式下各类车型协同的应急运输路径优化模型相继构建<sup>[11,12]</sup>。Marco 等考虑多目标下的道路安全,建立包含不同人口及城市特征的模型<sup>[13,14]</sup>。刘晗等考虑救援队伍及时性、经济性和工作量,对救援台站数量、灾难现场数量和算法精度等进行分析<sup>[15,16]</sup>。多信息主体下的协同忽略了应急物流响应的初衷,即在快速响应的基础上尽可能降低运输过程中的物流成本。

本文建立一类随疫情时间发展的应急物流决策框架模型。该模型以疫情感染患者数量作为物资需求确定依据,通过应急配送点所处位置,实现物资储备库、临时分拨中心两类应急设施协同选址,有效弥补单一型设施选址方法导致的设施之间位置冲突、配合低效的缺陷。并且,该模型能够根据需求点预测结果完成需求物资的分配与运输<sup>[17]</sup>。实验部分以“COVID-19”下的武汉市为背景,设计遗传-模拟退火算法对模型进行求解。实验结果表明,本文多层级协同选址提升了多层级储备库之间的协同性,节约物流配送成本。

# 1 突发公共卫生事件决策模型

突发公共卫生事件决策模型(图1)将突发公共卫生事件的应急响应时间划分为6个

连续的应急响应决策阶段( $s=1,2,3,...,6$ ),每个阶段中包含4个决策行为:疫情扩散行为预测、多级储备库应急协同选址、需求物流配送、需求确定及参数调整。

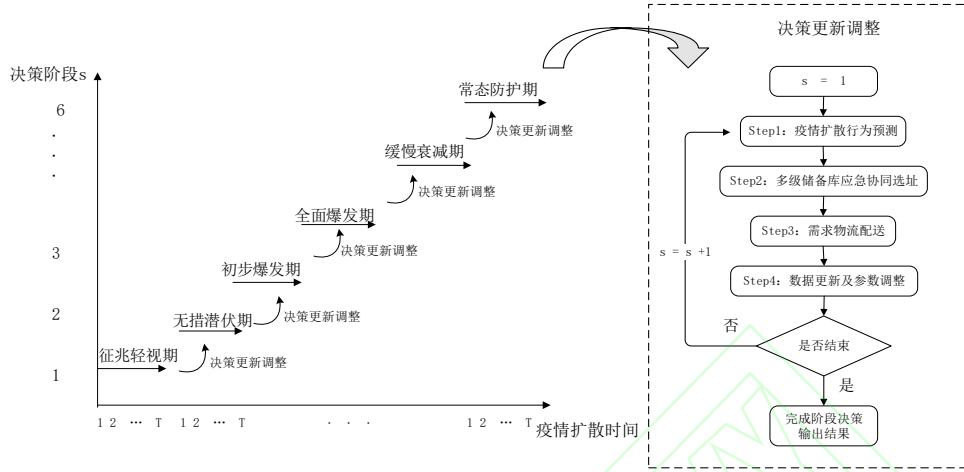


图1 疫情阶段决策框架模型

图1中,  $s=s+1$ 表示执行完本阶段4个决策行为后,进入下一阶段。在决策框架中,疫情扩散行为预测用于分析和获得第 $s$ 阶段患者人数,以确定物资需求量;多级储备库协同选址用于确定SNS和RDC位置;物资需求配送用于各EDP的应急物资配送;需求确定及参数调整用于对第 $s$ 个阶段相关参数进行调整以确定下一阶段物资需求总量。经过每个应急响应决策阶段的持续推进,最终得到整个疫情周期的决策行为。

## 1.1 疫情扩散分析

为充分了解“COVID-2019”新冠肺炎特性,考虑传统传染病模型忽略的患病死亡情况,构建了SIDR仓室模型(图2)。SIDR仓室模型将区域人群划分为四类:易感染者( $S$ )、感染者( $I$ )、死亡者( $D$ )及治愈者( $R$ )。易感染者是指因接触感染者或防护措施不当感染病毒从而成为感染者的人群。感染者通过治愈或者因个体体质等因素成为治愈者人群或死亡人群,四类人群构成区域内总人群。考虑在2019年底暴发的新型冠状病毒肺炎因防控措施采取迅速,我们假设区域内的人口相对稳定。

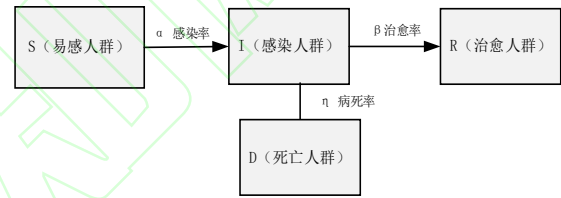


图2 疫情扩散分析模型

将疫情扩散行为描述为以下差分方程组:

$$S(t+1)=S(t)-\alpha_s I(t), \forall t \in T \quad (1)$$

$$I(t+1)=I(t)+\alpha_s I(t)-\eta_s I(t)-\beta_s I(t), \forall t \in T \quad (2)$$

$$D(t+1)=D(t)+\eta_s I(t), \forall t \in T \quad (3)$$

$$R(t+1)=R(t)+\beta_s I(t), \forall t \in T \quad (4)$$

其中,  $\alpha_s$ 为 $s$ 阶段易感染人群患病感染率,  $\eta_s$ 为 $s$ 阶段病死率,  $\beta_s$ 为 $s$ 阶段治愈率,  $S(t)$ 表示在 $t$ 时刻的易感染人数,  $I(t)$ 表示在 $t$ 时刻的感染人数,  $D(t)$ 表示在 $t$ 时刻因病死亡的死亡人数,  $R(t)$ 表示在 $t$ 时刻的康复者人数。

## 1.2 多层次储备库应急协同选址-配送模型

为考虑复杂物流系统内不同属性元素之间的相互作用和协作,众多学者对设施协同选址问题进行了一定的研究<sup>[18]</sup>。本文在若干应急配送点(EDP)已知的基础上,以三级运输网络距离(如图3所示)最小化为目标,



构建多类型设施协同空间选址框架，即物资储备库（SNS）和临时分拨中心（RDC）的优化选址模型，以同时确定各阶段物资储备库和临时分拨中心的选址方案，且每一阶段选址在前一阶段的基础上，进行增加或减少选址，目的是考虑实际情况减少选址的变动。

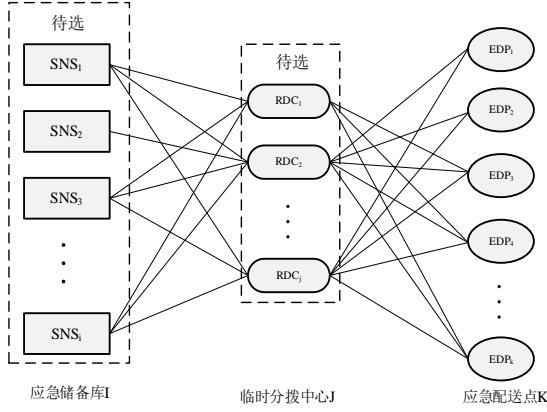


图3 三级运输网络图

在配送环节以运输里程最小及需求满足为原则，将每个应急需求点分配给主要供给的临时分拨中心，同时根据每个应急需求点的总需求量，调整物资储备库与临时分拨中心之间的供给关系，形成以各临时分拨中心为配送网络枢纽，末端应急物资需求点与物资储备库为始的多中心辐射配送网络布局。

根据 2019 抗击新型冠状病毒肺炎事件，为及时接受救治患者，合理的床位容量设置突发公共卫生事件的关键。同时，对于每个阶段而言，对应的多级储备库选址及配送需思考诸多问题，如下：1) 应急配送点（EDP）应设置多少隔离病床才能满足患者需求？2) 应急物资从物资储备库（SNS）下拨到当前阶段开放的各应急配送点，中间应设置多少个临时分拨中心？3) 如何选取物资储备库和临时分拨中心使得配送距离最短？4) 选址后如何配送更加快速便捷且最快满足应急物资需求？上述问题是决策者在疫情阶段需斟酌决策的难题，为此，列出模型所涉及符号定义如下：

**模型涉及变量：**

$S_i$ ：是否启动第  $i$  个物资储备库，若启动，则为 1，否则为 0； $R_j$ ：是否启动第  $j$  个临时分拨中心，若启动，则为 1，否则为 0； $BT_{jk}$ ：临时分拨中心  $j$  是否覆盖第  $k$  个应急配送点，覆盖则为 1，否则为 0； $x_{ij}$ ：车辆  $n$  从第  $i$  个物资储备库为第  $j$  个临时分拨中心运送物资，若是，则为 1，否则为 0； $y_{jk}$ ：车辆  $m$  从临时分拨中心  $j$  为应急配送点  $k$  运送物资，若是，则为 1，否则为 0； $u_{nij}$ ：车辆  $n$  为临时分拨中心运送物资后不返回物资储备库  $i$ ，若是，则为 1，否则为 0； $v_{mjk}$ ：车辆  $m$  为应急配送点  $k$  运送物资后不返回临时分拨中心  $j$ ，若是，则为 1，否则为 0；

**模型涉及集合：**

$I$ ：物资储备库集合， $I = 1, 2, 3, \dots, I$ ；

$J$ ：临时分拨中心集合， $J = I + 1, I + 2, I + 3, \dots, I + J$ ；

$K$ ：应急配送点的集合， $K = I + J + 1, I + J + 2, I + J + 3, \dots, I + J + K$ ；

$n$ ：一级配送车辆集合， $n = 1, 2, 3, \dots, n$ ；

$m$ ：二级配送车辆集合， $m = n + 1, n + 2, n + 3, \dots, n + m$ ；

**模型涉及参数：**

$d_{ij}$ ：第  $i$  个 SNS 到第  $j$  个 RDC 的运输距离；  
 $d'_{jk}$ ：第  $j$  个 RDC 到第  $k$  个 EDP 的运输距离；  
 $q_s$ ：每个感染者  $s$  阶段所需单位物资量； $RQ_j$ ：第  $j$  个临时分拨中心的最大存储量； $LN_1$ ：SNS-RDC 的单位车辆最大载重量； $LN_2$ ：RDC-EDP 的单位车辆最大载重量； $I_s$ ：第  $s$  阶段所存在的感染人数； $SR_{ij}$ ：从第  $i$  个 SNS 到第  $j$  个 RDC 的物资运送总量； $B_s$ ：第  $s$  阶段设置的病床总数量；

模型描述如下：

$$\min f = \sum_i \sum_j x_{ij} d_{ij} + \sum_j \sum_k y_{jk} d'_{jk} \quad (5)$$

$$\sum_i S_i \leq \text{card}(I), \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_j R_j < \text{card}(J), \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq S_i, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$Y_{jk} \leq R_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_j RQ_j \geq \sum_k q_s I_s Y_{jk}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_j SR_{ij} \leq \sum_j RQ_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (11)$$

$$SR_{ij} \geq \sum_j \sum_k Y_{jk} q_s I_s, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_j U_{nij} RQ_j \geq LN_1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_k V_{mjk} q_s I_s \geq LN_2, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_j BT_{jk} \geq 1, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (15)$$

$$BT_{jk} \leq R_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (16)$$

$$\sum_k Y_{jk} q_s I_s \leq MR_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (17)$$

$$\sum_k Y_{jk} \leq 1, \forall k \in K \quad (18)$$

$$B_s \geq I_s \quad (19)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (20)$$

$$Y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (21)$$

$$U_{nij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (22)$$

$$V_{mjk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (23)$$

$$R_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (24)$$

$$S_i \in \{0,1\}, \forall i \in I \quad (25)$$

$$BT_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (26)$$

上述模型中，目标函数(5)为第  $s$  个决策阶段疫情期间三级区域协同选址总距离。约束条件(6)和(7)确保物资储备库和临时分拨中心的开放数量小于备选点总数( $card$  表示有限集合内元素的个数)。(8)和(9)保证在物资储备库和临时分拨中心选用之后才能进行物资配送。(10)保证应急配送点的物资需求得到满足。(11)为物资储备库的供应物资能力限制；(12)确保物资储备库物资供应总量能满足应急配送点需求。(13)和(14)为车辆配送时车辆的载重限制。(15)确保每个应急配送点至少有

一个临时分拨中心为其提供物资。(16)和(17)保证只有临时分拨中心才能提供转运服务，其中(17)中  $M$  表示一个足够大的正整数，限制第  $j$  个临时分拨中心的最大周转能力。(18)确保每辆车每次只能从一个临时分拨中心出发。(19)为应急配送点床位容量设置限制。约束条件(20)~(26)为变量约束。上述模型研究的是一个连续多级储备库应急协同选址分配问题，阶段选址数量未定。

### 1.3 需求确定及参数调整

该环节的主要目的是调整上一阶段疫情扩散模型中所涉及的参数，对参数进行调整并确定下一阶段物资需求量。对于每一决策阶段而言，执行完第三环节即物资需求配送后，能够得到该阶段内的实际疫情数据，该数据用于修正前面的预测结果。参数的调整由以下方程组得到：

$$S'(t+1) - \Delta\alpha_s = 0, \forall t \in T \quad (27)$$

$$I'(t+1) - \Delta\alpha_s - \Delta\beta_s - \Delta\eta_s = 0, \forall t \in T \quad (28)$$

$$D'(t+1) - \Delta\eta_s = 0, \forall t \in T \quad (29)$$

$$R'(t+1) - \Delta\beta_s = 0, \forall t \in T \quad (30)$$

其中， $S'(t+1), I'(t+1), D'(t+1), R'(t+1)$  表示该决策阶段内收集到的实际数据， $\Delta\alpha_s, \Delta\beta_s, \Delta\eta_s$  为  $s$  决策阶段待求解调整的参数。定义  $X = (\Delta\alpha_s, \Delta\beta_s, \Delta\eta_s, \Delta\gamma_s)$ ,  $B$  为系数矩阵， $b$  为固定向量。对于任意时刻  $t = 1, 2, 3, \dots, T-1$ ，上述线性方程组可以表示为：

$$BX = b \quad (31)$$

在 2.1 节疫情扩散 SIDR 模型中，已假定区域内总人口数为常量  $N_t$ ，其中  $N_t = S_t + I_t + D_t + R_t, \forall t \in T$ ，根据人口总数，对线性方程组(31)进行行列式变换，可得系数矩阵秩等于其增广矩阵的秩，表明线性方程组有且仅有唯一解，故对下一决策周期参数进行调整，如下：

$$\alpha_s^* = \Delta\alpha_s, \forall s \in S \quad (32)$$

$$\beta_s^* = \Delta\beta_s, \forall s \in S \quad (33)$$

$$\eta_s^* = \Delta\eta_s, \forall s \in S \quad (34)$$

## 2 模型求解算法设计

本文疫情决策框架模型是一个混合整数规划模型，上述模型可以分为 2 个子问题即 SNS 与 RDC 选址问题和物资需求配送路径优化问题。针对本文问题，设计 GA-SA 算法进行求解：采用遗传算法进行设施选址优化，采用 SA 算法将 GA 寻优过程中的设施选址结果作为输入，同步进行物资配送优化，并将优化结果反馈给 SA, GA 和 SA 分工合作，协同完成本文协同选址-配送问题，算法框架图如图 4 所示，详细步骤如下。

**Step1:** 输入模型相关数据及参数，当  $s = s$  ( $S$  为总的决策阶段数， $s$  为现决策阶段) 时，根据第  $s$  阶段数据进行疫情扩散分析获得预测感染人数、治愈人数以及死亡人数。

**Step2:** 编码，采用二进制编码方法，染色体长度为  $card(I) + card(J) + card(K)$ ，产生选址初始种群。遗传操作：适应度值计算，选择、交叉、变异、种群更新  $X_0$ ；

**Step3:** 获得第  $s$  阶段选址方案，进行第  $s$  阶段物资需求配送预处理，聚类获得临时分拨中心主服务需求点列表。

**Step4:** 设定初始温度  $T = T_0$ ，终止温度  $T_{end}$ ，降温速度  $\alpha$  以及随机初始解

**Step5:** 对当前解  $x_i$  作随机扰动产生新解  $x_j$ ；

**Step6:** 计算当前路径  $x_i$  代价函数值  $f(x_i)$ ，以及  $x_i$  代价函数的增量  $df = f(x_j)$ ；

**Step7:** 判断是否跳出内循环，若是，转到 Step8；否则转到 Step5；

**Step8:** 判断当前温度是否达到温度阈值，若满足条件，输出配送路径并终止循环；否则，转到 Step5。

**Step9:** 需求确定及参数调整，进入第  $s$  阶段第 4 环节，调整上一阶段各参数，对下一阶段进行疫情扩散行为分析  $s = s + 1$ 。

**Step10:** 输出应急物流响应方案，完成应急救援响应。

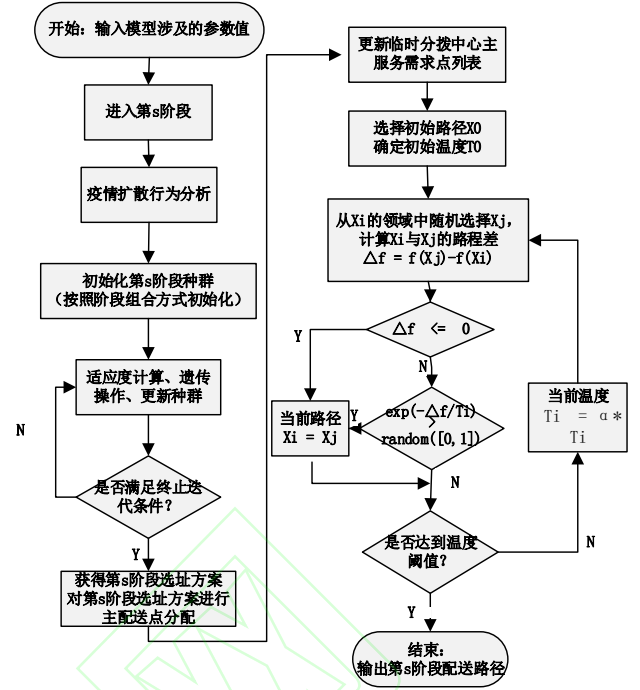


图 4 算法整体框架图

## 3 实验测试分析

### 3.1 案例背景和参数设置

本文以 COVID-19 疫情下的武汉市作为案例背景，以武汉市各大物资储备中心作为物资储备库备选点，一共 6 个；以武汉市各大物资调度中心作为临时分拨中心备选点，一共 7 个；以武汉市疫情期间开放的 15 家方舱医院作为应急配送点，开放顺序按方舱医院实际开放顺序，其中各备选点的地理位置信息已提前获知，各备选点之间真实路网距离通过 DataMap 调用高德地图获得。COVID-19 疫情数据来源于湖北省卫生健康委员会，数据涵盖 2020 年 1 月 16 日-3 月 18 日武汉市每日新增确诊病例数、累计确诊病例数、累计治愈病例数以及累计死亡病例数，共 60 组数据；同时，假设每一阶段每位患者物资需求量为 1 个单位，EDP 具体需求量运用正态分布随机数产生如表 2；每一决策阶段响应时间设为 10 天，针对本文案例阶段时间共计 60 天。

### 3.2 实验结果及分析

#### 3.2.1 疫情扩散行为预测结果和最优床位容量设置

图 5 中,通过对预测感染患者和实际感染患者对比可得,在疫情扩散即将达到高峰前,本文所预测的感染患者人数高于实际感染患者人数,这样有利于提前做出应对措施。图中原始数据最高处因湖北省确诊标准发生改变,导致数据出现激增。总体看来,本文疫情扩散模型预测精度较好,相关数据的 R-squared 检验也再次证明,本文疫情扩散模型效果较为显著。图中阶梯形虚线为应急配送点设置的最优床位容量,该容量呈阶梯状。由于突发公共卫生事件的突发性和难以预测性,这种容量设置方式提升了阶段内 EDP 应对突发公共卫生事件的弹性,以应对更多难以预测的变化。

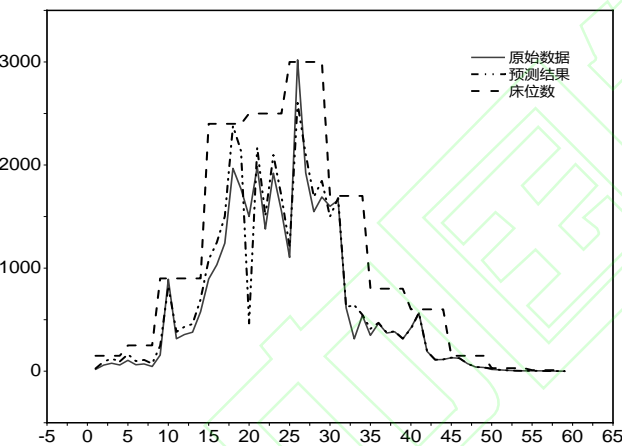


图 5 每日新增感染人数预测结果及实际数据比较

#### 3.2.2 不同决策阶段疫情扩散参数调整情况

图 6 显示了在不同的阶段决策周期内,疫情扩散相关参数易感染人群感染率 ( $\alpha$ )、感染者治愈率 ( $\beta$ ) 以及患者病死率 ( $\eta$ ) 的变化情况。从图表看来,参数  $\eta$  仅有细微变化,但因武汉市人口基数大,人群整体却发生较大变化,病死率 ( $\eta$ ) 前期较高,后期疫情得到防控后走向平缓。随着疫情防控阶段的不断推进,感染率 ( $\alpha$ ) 在不断下降;感染者治愈率 ( $\beta$ ),在前期处于较低水平,中期随防控救治措施采取,  $\beta$  处于较高水平,后期  $\beta$  随感染人数减少而逐渐减少。同时,患者人数在前 2 个阶段不断增加,在第 3 阶段达到顶峰,

随后感染患者走向消亡,这与图 5 预测结果是符合一致的。

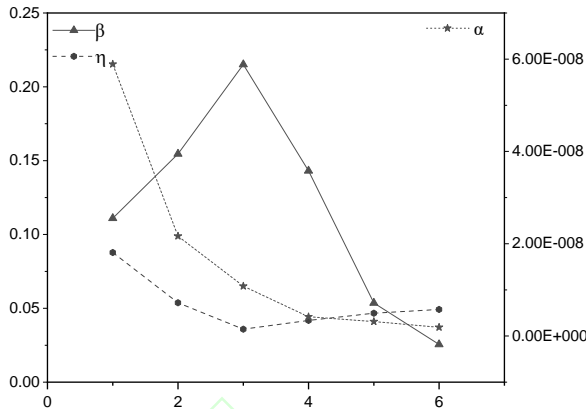


图 6 不同阶段疫情扩散参数变化图

#### 3.2.3 不同决策阶段多层次选址结果及对比

表 1 为不同决策阶段的 SNS 及 RDC 选址结果。为进一步分析本文模型,通过式(35)求得协同选址与传统选址行驶路径距离之间的差异百分比,传统选址策略下路径距离表示为  $Tra_c$ ,本文选址下的路径距离表示为  $Col_c$ ,具体差异百分比见表 1。

表 1 不同决策阶段 SNS、RDC 选址及对比情况

阶段 $s$	EDP	SNS	RDC	$Gap_c(\%)$
	开放点	选址	选址	
1	$K_1, K_2$	$I_1, I_4$	$J_2$	130.75
2	$K_1-K_4$	$I_1, I_4$	$J_2$	72.31
3	$K_1-K_7$	$I_1, I_2, I_4$	$J_2, J_3$	34.91
4	$K_1-K_{11}$	$I_1, I_2, I_4, I_5$	$J_1, J_2, J_3$	4.95
5	$K_1-K_{13}$	$I_1, I_2, I_4, I_5$	$J_1, J_2, J_3$	12.35
6	$K_1-K_{15}$	$I_1, I_2, I_5$	$J_1, J_2$	47.59

此外,对于不同决策阶段进行实施协同选址方案对实施救援工作进行带来的提升做出了对比(图 7)。



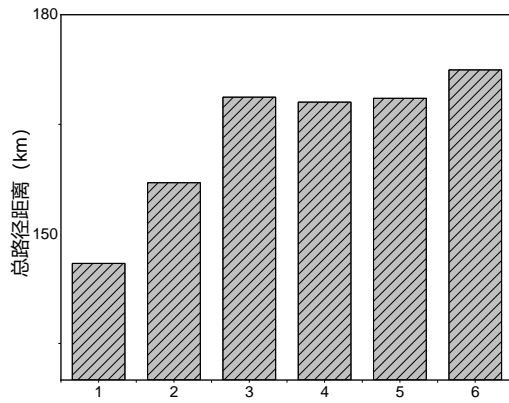


图 7 不同决策阶段介入总路径距离

由图可知,对各个决策阶段进行介入,实施协同选址方案后,6个阶段总的车辆行驶距离有明显的差别。

$$Gap_c = (Tra_c - Col_c) / Col_c \times 100\% \quad (35)$$

### 3.2.4 不同决策阶段配送情况

在配送环节,配送距离以武汉市各层级之间真实路网距离作为实验数据。为节约物流配送成本,SNS-RDC 配送采用大型车辆,平均装载量为 12000 单位物资进行配送;RDC-EDP 配送采用小型车,平均装载量为 7000 单位物资。此外,在开放的 EDP 数量的基础上,SNS 和 RDC 数量也在随着疫情扩散阶段变化。表 2 为每阶段 EDP 需求量,表 3 为各决策阶段 RDC-EDP 配送路径,其中车辆行驶路径按照实验过程中编码方式展示,编号 6,7,8 均为临时分拨中心。

表 2 决策阶段应急配送点需求量

阶段 $s$	EDP 编号	需求量(件)	EDP 编号	需求量(件)	EDP 编号	需求量(件)	EDP 编号	需求量(件)
1	$K_1$	731	$K_2$	1232				
2	$K_1$	2051	$K_2$	3377	$K_3$	2186	$K_4$	5011
3	$K_1$	5109	$K_2$	2813	$K_3$	3224	$K_4$	3759
	$K_5$	4005	$K_6$	6399	$K_7$	5733		
	$K_1$	3029	$K_2$	4364	$K_3$	3261	$K_4$	2656
	$K_5$	5882	$K_6$	3773	$K_7$	2016	$K_8$	3226
4	$K_5$	2541	$K_6$	3643	$K_7$	3906	$K_8$	2167
	$K_9$	2977	$K_{10}$	4761	$K_{11}$	1664	$K_{12}$	1148
	$K_{13}$	1226						
	$K_1$	1882	$K_2$	3218	$K_3$	1672	$K_4$	1308
	$K_5$	2220	$K_6$	238	$K_7$	1920	$K_8$	2966
6	$K_9$	3003	$K_{10}$	2641	$K_{11}$	4796	$K_{12}$	4001
	$K_{13}$	4108	$K_{14}$	2326	$K_{15}$	2065		

表 3 各决策阶段 RDC-EDP 配送路径

阶段 $s$	RDC-EDP 配送路径	总距离 (km)
1	7-13-14-7	8.446
2	7-13-7-16-7-14-15-7	16.191
3	7-13-7-13-14-7-16-15-7-18-7、8-19-8	20.984
4	6-13-23-6、7-22-7-17-7-20-18-7-14-21-7-16-15-7、8-19-8	30.600

5	6-13-23-6、7-22-24-18-7-21-14-7-17-25-7-15-16-7-20-7、8-19-8	31.607
6	6-19-23-6-13-6、7-14-21-7-26-7-25-17-22-7-16-18-24-7-20-15-7-27-7	38.142

### 3.2.5 算法比较分析

针对第 6 决策阶段 RDC 运输路线进行求解 10 次进行对比, 如表 4 所示。在表 4 中, 最后一列为每次结果与最优值的差异百分比。为检验算法对比的有效性, SA 及 GA 求解过程中均保持相同迭代次数 100 次, SA 为本文算法求解结果, GA 为传统遗传算法求解路径结果, 差异百分比为 10 次结果与最优值的差异百分比平均值。

表 4 算法比较图

次数	算法	
	GA	SA
1st	249611	198164
2nd	204612	197394
3rd	240038	197607
4th	256424	206862
5th	240038	197607
6th	195894	194216
7th	205506	194216
8th	251487	197936
9th	198064	194216
10th	240038	197394
差异百分比(%)	17.84	2.47

实验结果表明, 本文所运用算法更加适合本文模型。

## 4 总结

本文根据疫情发展的一般规律, 构建应急多层级储备库选址及物流配送决策模型。本文的主要理论贡献包括: 1) 从协同视角构建了突发公共卫生事件下应急响应决策模型, 解决应急管理决策行为模糊的问题 2) 将疫情扩散模型与协同选址相结合, 提出适应应急物资保障的模型, 该模型解决的是一个基

础性框架问题而非单个巧合问题。

### 参考文献:

- [1] 胡智鹏,李瑶,宋绍成,王静茹.突发公共卫生事件大数据分析与防控策略研究[J].情报科学,2020,38(11):104-109.
- [2] 段倩倩,白鹏飞,张小咏,蔡冬雪.协同视角下多级救灾物资储备体系中的储备库选址模型[J].数学的实践与认识,2018,48(21):141-148.
- [3] 康凯,陈涛,袁宏永.多层级应急救援协同调度模型[J].清华大学学报(自然科学版),2016,56(08):830-835+843.
- [4] 郑斌,马祖军,周愉峰.震后应急物流动态选址-联运问题的双层规划模型[J].系统管理学报,2017,26(02):326-337.
- [5] Liu K L, Li Q F, Zhang Z H, Distributionally robust optimization of an emergency medical service station location and sizing problem with joint chance constraints[J], Transportation Research Part B: Methodological,2019,119:79-101.
- [6] 刘明,曹杰,章定.数据驱动的疫情应急物流网络动态调整优化[J].系统工程理论与实践,2020,40(02):437-448.
- [7] 王新平,王海燕.多疫区多周期应急物资协同优化调度[J].系统工程理论与实践,2012,32(02):283-291.
- [8] 葛洪磊,刘南.复杂灾害情景下应急资源配置的随机规划模型[J].系统工程理论与实践,2014,34(12):3034-3042.
- [9] Wang H M, Xu R F, Xiong Z J, Wang Q H, Duan Q, Bu X C. Research on the Optimized Dispatch and Transportation

- Scheme for Emergency Logistics[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 129:208-214.
- [10] Zhang J H, Liu H Y, Yu G D. A three-stage and multi-objective stochastic programming model to improve the sustainable rescue ability by considering secondary disasters in emergency logistics[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135:1145-1154.
- [11] 朱莉,丁家兰,马铮. 应急条件下异构运输问题的协同优化研究[J]. *管理学报*, 2018, 15(02):309-316.
- [12] 王芃,刘伟佳,林振智,文福拴,董朝阳,郑宇,张睿. 基于场景分析的风电场与电转气厂站协同选址规划[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(06):20-29.
- [13] Marco Amorim, Sara Ferreira, António Couto, Road safety and the urban emergency medical service (uEMS): Strategy station location[J], *Journal of Transport & Health*, 2017, 6:60-72.
- [14] 赖志柱,王铮,戈冬梅,陈玉龙. 多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(05):74-83.
- [15] Feng J R, Gai W M, Li J Y. Multi-objective optimization of rescue station selection for emergency logistics management[J]. *Safety Science*, 2019, 120:276-282.
- [16] 刘晗. 超立方体排队均衡下消防协同救援设施选址配置优化研究[D]: 哈尔滨哈尔滨工业大学, 2018.
- [17] 尚正阳,顾寄南,王建平. 求解带能力约束车辆路径优化问题的改进模拟退火算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2020:1-16.
- [18] 陶经辉,郭小伟. 基于总成本和碳减排的物流园区与产业园区协同选址[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(12):124-134.