

# 基于疫情演化的应急医疗物资调度优化研究

何珊珊, 费延飞

防灾科技学院, 北京

收稿日期: 2022年7月4日; 录用日期: 2022年8月2日; 发布日期: 2022年8月8日

## 摘要

从疫情演化数据更新的视角, 结合SIR传染病扩散模型, 考虑应急医疗物资分配的公平性原则和最大效用的原则, 构建依据随疫情演化的时变需求预测模型以及调度方案的多目标优化模型, 合理决策各周期每个疫区点的应急医疗物资调度方案。结果表明: 结合疫情演化的动态变化, 可以实现应急医疗物资的需求预测与配送之间的有效协同, 能够为疫情应急管理提供有益的决策参考。

## 关键词

疫情, 应急物流, SIR传染病模型, 动态需求预测

# Research on Emergency Medical Materials Scheduling Optimization Based on Epidemic Evolution

Shanshan He, Yanfei Fei

Institute of Disaster Prevention, Beijing

Received: Jul. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2022; published: Aug. 8<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Considering the principle of fairness and the principle of maximum utility in the distribution of emergency medical materials, a SIR epidemic model was proposed from the perspective of epidemic evolution data updating, and a time-varying demand forecasting model and the multi-objective optimization model of the dispatching scheme was built to decide the distribution scheme of emergency medical materials in each epidemic area. The results show that the effective coordination between the demand forecast and distribution of emergency medical materials can be realized by

combining the dynamic change of the epidemic situation evolution, the decision framework model can provide useful reference for emergency management of epidemic situation.

## Keywords

Epidemic Situation, Emergency Logistics, *SIR* Epidemic Model, Dynamic Demand Forecast

Copyright © 2022 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

当某一种流行性传染病爆发后, 尽管会采取严格的隔离措施, 但由于人口流动等原因, 病源不可避免会被传播到其他地区, 特别是与初始疫区距离较近的周边地区, 被疾病传染的概率更大[1]。因此, 需要随着疫情演化将应急物资需求进行实时调整, 并在各疫区之间合理分配, 有效地提高应急救援效率。

关于疫情物资调度问题, 现有的理论研究成果主要有两方面的体现。突发疫情环境下的应急物流网络设计相关研究, 主要针对突发疫情扩散环境下, 如何布局应急服务设施, 有效满足患者的应急医疗资源需求, 如 Ekid 等[2]建立了疫情扩散与食物转运选址组合优化模型, 并设计了启发式算法以求解大规模实际问题, 朱莉和曹杰[3]以 *SIR* 传染病模型为基础, 构建了多层应急物流网络模型。突发疫情环境下的应急物资动态分配相关研究, 主要针对突发疫情环境下, 如何动态分配有限的应急物资, 以获取最优的救援效果, 在这类文献研究中, 大多将传染病扩散模型用于应急时变需求的预测[4] [5], 然后在此基础上构建相应的应急物资调度网络。刘明[6]从数据驱动的视角提出了一类应急物流网络动态调整优化决策框架模型, 陈丰[7]提出了以医疗物资短缺延迟成本最小与物流成本最小的双目标优化模型。

考虑到满足疫情演化对应急物资调度的实时调整需求, 有必要从疫情演化数据更新的视角, 构建一类创新的应急物资调度决策框架模型, 在该决策框架下, 应急调度时间被划分为多个连续的决策阶段, 通过每个阶段的迭代更新, 最终将整个疫情的应急响应过程, 转化为应急物资调度随疫情演化不断优化的协同决策过程, 从而求得对疫情应急资源调度的动态调整方案。本模型具有下列显著优势: 充分融入了疫情演化的建模思想, 力求实现疫情应急资源调度的实时调整优化, 所设计的应急调度具有非常好的通用性和扩展性, 可为大多数疫情应急救援提供一个基础性的决策框架。

## 2. 模型建立

考虑多应急配送中心, 多疫区点的应急医疗物资配送网络, 将有限的应急医疗物资从  $m$  个应急配送中心分配到  $n$  个疫区点。构建一类应急医疗物资调度的多目标优化数学模型, 主要考虑应急医疗物资分配的公平性原则和最大效用的原则, 依据随疫情演化的时变需求预测模型, 合理决策各周期每个疫区点的应急医疗物资配送量。假设及符号表示如下。

假设 1: 多个应急物资配送中心以及多个疫区点的地理位置已知;

假设 2: 由于应急医疗物资需求量较大的特点, 配送采用直配模式, 从应急救援中心出发, 采用最优路径方式, 到达疫区点, 卸货后, 返回应急救援中心;

假设 3: 为保证应急物资分配的时效性, 在应急物资配送中心出发前, 各种应急物资已经进行相应组合, 考虑单一应急物资的分配。

$T$ :  $T = \{t | T_1, T_2, \dots, T_{k_1}, T_{k_1+1}, T_{k_1+2}, \dots, T_{k_2}, \dots, T_{k_{p-1}+1}, T_{k_{p-2}+2}, \dots, T_{k_p}\}$  由  $p$  个决策周期构成的疫情天数, 第  $p \in P$  个决策周期有  $k_p$  天;

$C$ :  $C = \{i | 1, 2, \dots, m\}$  应急医疗物资配送中心集合;

$C_i^p$ : 第  $p$  决策周期应急医疗物资配送中心  $i$  供应量;

$D$ :  $D = \{j | 1, 2, \dots, n\}$  疫区点集合;

$D_j^p$ : 第  $p$  决策周期疫区点  $j$  的医疗物资需求量;

$\alpha_j$ : 疫区点  $j$  的需求紧迫系数;

$\beta_j$ : 疫区点  $j$  的应急医疗物资需求分配比例;

$x_{ij}^p$ : 第  $p$  决策周期应急配送中心  $i$  分配给疫区点  $j$  的配送量;

$y_j^p$ : 第  $p$  决策周期疫区点  $j$  的预测需求量;

$t_{ij}$ : 应急配送中心  $i$  到疫区点  $j$  的时间。

## 2.1. 疫情应急物资动态需求预测

采用传统的  $SIR$  传染病扩散模型来描述传播规律, 此模型是计算各疫区各阶段应急物资需求量的依据。由于疫情的实际数据往往与我们所预测的数据存在差异, 需要利用实际数据对疫情参数进行调整, 考虑到越靠近决策阶段后期的疫情数据对下一个决策阶段的疫情参数更新影响越大的原则, 建立相关数据统计值和预测值的加权误差优化模型, 以获得更新后的疫情相关参数, 并将其代入下一个决策周期的疫情扩散模型中。 $SIR$  传染病扩散模型及参变量定义如下。

$$\begin{cases} I(t+1) - I(t) = \beta^p S(t) I(t) - \gamma^p I(t) \\ S(t+1) - S(t) = -\beta^p S(t) I(t) \\ R(t+1) - R(t) = \gamma^p I(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

模型(2.1)表达式中  $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$  分别表示疫情持续第  $t$  天的易感染区域、患病区域、康复区域的人数;  $\beta^p$ 、 $\gamma^p$  分别表示第  $p$  决策周期的疫情传染率和恢复率。当确定初始值  $S(0)$ 、 $I(0)$ 、 $R(0)$  及每个决策周期的参数值, 就可以确定该周期  $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$  的演化轨迹。对于参数值  $\beta^k$ 、 $\gamma^k$  的拟合, 可以根据第  $p$  决策周期内收集到的每日实际数据, 进而对第  $p+1$  决策周期的相关参数进行调整更新, 调整的目标是最小化前  $p$  个周期中所有天数的加权预测误差, 以便我们可以对下一个周期进行“最佳”预测。第  $p$  决策周期内根据疫情演化的参数优化目标函数可以表示为:

$$\min \sum_{i=1}^{T_{k_p}} \theta_i \left\{ \left[ S_i - S(t_i, \beta^p, \gamma^p) \right]^2 + \left[ I_i - I(t_i, \beta^p, \gamma^p) \right]^2 + \left[ R_i - R(t_i, \beta^p, \gamma^p) \right]^2 \right\} \quad (2.2)$$

目标函数(2.2)中  $\beta^p$ 、 $\gamma^p$  是第  $p$  决策周期疫情传染率和恢复率待估计量,  $(t_i, S_i, I_i, R_i)$  为统计得到的第  $i$  天的易感染、患病、康复的人数,  $S(t_i, \beta^p, \gamma^p)$ ,  $I(t_i, \beta^p, \gamma^p)$ ,  $R(t_i, \beta^p, \gamma^p)$ , 为预测得到的第  $i$  天的易感染、患病、康复的人数, 优化的目标是不断优化参数  $\beta^p$ 、 $\gamma^p$ , 使预测值和观测值之间的加权误差平方和最小,  $\theta_i$  是优化权重系数。

对于应急医疗物资需求量的预测, 由于患者人数与应急医疗物资的需求量之间存在着线性关系, 可以根据  $D(t) = at + b$  量化应急物资的需求量。相关部门可以根据具体物资种类进行参数  $a$ 、 $b$  的设定。

## 2.2. 调度方案的多目标优化模型

从应急物资配送的角度, 疫情发生后的救援期通常可以划分为紧急救援期和持续救援期两个阶段。

紧急救援期应公平优先, 兼顾效率; 而持续救援期是效率优先, 兼顾公平。建模过程中, 目标函数需兼顾效率与公平, 效率可以通过总时间效用最大, 公平可以通过每个受灾点在考虑配送需求紧迫的情况下, 应急医疗物资调度紧缺性最小化。构建如下数学模型。

$$obj_1 = \max_{p \in P} \sum_{j=1}^n \ln(U_j^p) \quad (2.3)$$

$$obj_2 = \min_{p \in P} \sum_{j \in D} \alpha_j \Delta \delta_j^p \quad (2.4)$$

$$z_j^p = \sum_{k \in K} \sum_{i \in C} \frac{y_{ij}^p}{t_{ij}} \quad (2.5)$$

$$U_j^p = \frac{z_j^p}{\sum_{j=1}^D z_j^p} \quad (2.6)$$

$$\Delta \delta_j^p = \beta_j \sum_{t=I_{k_{p-1}}+1}^{I_{k_p}} I(t) - \sum_{i \in C} y_{ij}^p \quad (2.7)$$

$$\sum_{j \in D} y_{ij}^p \leq C_i^p \quad (2.8)$$

$$\Delta \delta_j^p \geq 0, \quad (2.9)$$

目标函数(2.3)为总时间效用函数, 以提高应急医疗物资运输的时效性, 目标函数(2.4)为公平性目标函数, 利用紧迫性系数  $\alpha_j$  量化各个物资需求点的服务紧迫性, 确保受灾严重的疫区优先分配到物资, 即应急医疗物资调度紧缺性最小化。约束(2.5)计算第  $p$  决策周期疫区点  $j$  单位时间的应急医疗物资分配量, 为了消除量纲对(2.5)进行归一化处理得到约束(2.6), 利用对数效用曲线量化应急医疗物资的时间效用, 即可得到应急医疗物资分配的总时间效用。疫情爆发初期, 应急医疗物资的会供不应求的状况, 避免有可能造成某些地区的病亡率增加, 在第  $p$  决策周期, 计算第  $p$  决策周期疫区点  $j$  应急医疗物资的需求短缺(2.7), (2.8)与(2.9)为应急医疗物资分配的其他相关约束。

据此, 建立表达式(2.3)~(2.9)的多目标规划数学模型。为了使数学模型符合应急救援实际情景, 在疫情紧急救援期, 设定  $obj_1$  大于  $obj_2$ , 即  $l$  大于  $v$ ; 而疫情持续救援期, 可以通过打分法对  $obj_1$  和  $obj_2$  进行加权, 进而将多目标规划模型化归为单目标模型, 即

$$\min = obj_2 (ld_2^- + vd_1^+) + obj_1 d_1^+ \quad (2.10)$$

### 3. 模型求解

模型求解的主要策略是将多个决策的动态问题转换为单个决策静态问题, 对疫区点同步开展应急医疗物资需求预测与应急物资的配送等问题。在此过程中, 应急医疗物资需求由于疫情演化而动态变化, 使得疫情发生后配送依托的应急物流网络是变化的。将每个疫情决策周期作为一个阶段, 从而将动态应急物流网络路网的配送, 具体流程如图 1。

Matlab 是目前比较简单、功能强大的计算编程语言, 很是适合本文的研究工作。对于传染病模型和参数调整模型, 可以直接利用 matlab 中的微分方程求解器 ode45() 和最小二乘准则(LS)建立目标函数, 使用 Nelder-Mead 单纯形算法求解器 fminsearch() 优化目标函数[8]。对于调度方案多目标优化模型可以利用模拟退火算法求解, 模型中的约束条件可以通过惩罚函数的形式构建到目标函数中, 从而形成无约束的最小化问题[9]。

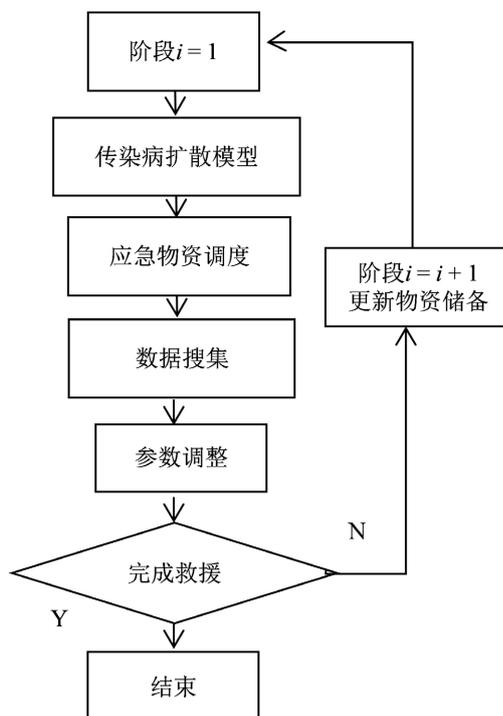


Figure 1. Solution flow chart  
图 1. 求解流程图

#### 4. 结论

本文主要考虑到满足疫情演化对应急物资调度的实时调整需求, 从疫情演化数据更新的视角, 构建一类创新的应急物资调度动态调整决策框架模型。应急响应时间被划分为多个连续的决策阶段, 每个决策阶段蕴含了疫情扩散分析、调度方案、数据收集处理和参数调整更新等逐次递进的 4 个环节。通过迭代更新, 最终将整个疫情的应急响应过程, 转化为在应急物流网络中随疫情演化不断优化配置的协同决策过程。在实际应急响应过程中, 决策者可以不断地将疫情实时数据输入上述交互多式联运决策框架模型, 从而求得对疫情应急资源调度的实时调整方案。本模型具有非常好的通用性和可扩展性, 可以为大多数疫情应急救援提供一个基础性的决策框架。

#### 基金项目

廊坊市科技支撑计划项目(2021013090); 防灾科技学院 2022 年大学生创新创业训练计划项目(X202211775151)。

#### 参考文献

- [1] 盛华雄, 吴琳, 肖长亮. 新冠肺炎疫情传播建模分析与预测[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 759-766.
- [2] Ekici, A., Keskinocak, P. and Swann, J.L. (2014) Modeling Influenza Pandemic and Planning Food Distribution. *Manufacturing & Service Operations Management*, **16**, 11-27. <https://doi.org/10.1287/msom.2013.0460>
- [3] 朱莉, 曹杰. 面向灾害扩散的模糊需求下应急调配优化研究[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(6): 663-673.
- [4] Liu, M. and Zhang, D. (2016) A Dynamic Logistics Model for Medical Resources Allocation in an Epidemic Control with Demand Forecast Updating. *Journal of the Operational Research Society*, **67**, 841-852. <https://doi.org/10.1057/jors.2015.105>
- [5] Dasaklis, T.K., Rachaniotis, N. and Pappis, C. (2017) Emergency Supply Chain Management for Controlling a Small-

pox Outbreak: The Case for Regional Mass Vaccination. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 4, 27-40. <https://doi.org/10.1080/23302674.2015.1126379>

- [6] 刘明, 吕忠全. 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(2): 437-448.
- [7] 陈丰, 丁文龙, 等. 公共卫生事件暴发初期的医疗物资调度优化[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 65-72.
- [8] 王福昌, 张丽娟, 靳志同. 食饵-捕食者模型参数拟合方法[J]. 高师理科学刊报, 2017, 37(11): 6-9.
- [9] 卓金武, 王鸿钧. MATLAB 数学建模方法与实践(第3版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.