

控制与决策

Control and Decision

面向感染错峰的疫情应急资源跨区域协同调度优化研究

开吉, 张淑华, 刘明, 曹杰

引用本文:

开吉, 张淑华, 刘明, 等. 面向感染错峰的疫情应急资源跨区域协同调度优化研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(6): 2003–2010.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0666>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种面向严重受损路网的抢修队调度算法

An algorithm for repair crew scheduling on severely damaged road network

控制与决策. 2021, 36(7): 1663–1671 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1582>

基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价

Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM

控制与决策. 2021, 36(6): 1333–1341 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1128>

考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness

控制与决策. 2021, 36(2): 483–490 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919>

混合决策下考虑第三方偏好的远程医疗服务匹配方法

Matching method for telemedicine service considering third-party preferences in context of mixed decision-making

控制与决策. 2021, 36(11): 2803–2811 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0447>

面向感染错峰的疫情应急资源跨区域协同调度优化研究

开吉¹, 张淑华¹, 刘明^{1†}, 曹杰²

(1. 南京理工大学经济管理学院, 南京 210094; 2. 徐州工程学院管理工程学院, 江苏徐州 221018)

摘要: 面对重大突发公共卫生事件, 单体城市的防疫资源总是有限的, 而利用好不同城市感染错峰, 协同调度好城市群内部的不同防疫人员及物资, 可以有效提高应急救援效率. 基于此, 从感染错峰的视角构建一类涵盖应急医院选址、应急物资跨区域转运、医护人员跨区域支援的疫情应急资源跨区域协同调度优化模型. 在该混合整数规划模型中, 充分考虑资源调度过程中的多重异质性、多周期下多决策耦合效应等. 研究表明: 面对重大突发公共卫生事件时, 患者的需求满足率才是决策者首要的考虑因素; 在实施分级诊疗的过程中, 应选择轻症宽松匹配策略而非最优的完全匹配策略; 同时决策者也需要注意, 应急救援物资量、医护人员数以及应急医院容量等重要参数均存在较为明显的阈值效应. 这些研究结论可为重大突发公共卫生事件应急资源跨区域协同调度提供具体决策支撑.

关键词: 重大突发公共卫生事件; 感染错峰; 协同调度; 城市群应急管理; 应急资源配置

中图分类号: C935 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0666

引用格式: 开吉, 张淑华, 刘明, 等. 面向感染错峰的疫情应急资源跨区域协同调度优化研究 [J]. 控制与决策, 2025, 40(6): 2003-2010.

Optimal research for cross-regional cooperative scheduling of emergency resources in major public health emergencies for infection staggered peaks

KAI Ji¹, ZHANG Shu-hua¹, LIU Ming^{1†}, CAO Jie²

(1. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Management Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract: In the face of major public health emergencies, the epidemic prevention resources of individual cities are always limited. However, it is effective for improving the efficiency of emergency rescue to utilize different city infection peaks and cooperatively dispatch different epidemic prevention personnel and materials within the urban cluster. Based on this, this paper constructs a cross regional collaborative scheduling optimization model for epidemic emergency resources from the perspective of infection staggered peaks, covering emergency hospital site selection, cross regional transportation of emergency materials, and cross regional support of medical staff. This mixed integer programming model fully considers multiple heterogeneity and multi decision coupling effects in resource scheduling processes. The results indicate that in the face of major public health emergencies, the satisfaction rate of patients' needs is the primary consideration factor for decision-makers. In the process of implementing graded diagnosis and treatment, a relaxed matching strategy for mild symptoms should be chosen instead of the optimal perfect matching strategy. At the same time, decision-makers also note that important parameters such as the amount of emergency supplies, the number of medical staff, and the capacity of emergency hospitals all have significant threshold effects. These research conclusions can provide specific decision-making support for cross regional collaborative scheduling of emergency resources for major public health emergencies.

Keywords: major public health emergencies; infection staggered peaks; cooperative scheduling; emergency management of agglomerations; emergency resource allocation

0 引言

京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝都市圈等

城市群逐渐成为我国未来经济发展的核心引擎. 提高城市群应对重大突发公共卫生事件的应急管理能

收稿日期: 2024-06-04; 录用日期: 2024-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72171119).

†通信作者. E-mail: liuming@njust.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

力,对于维护国家和社会的稳定具有举足轻重的作用.重大突发公共卫生事件中不同城市的病毒传播速率不同,不同地区间感染高峰的时间也不同,而单体城市的防疫资源总是有限的,这种差异为城市间协同调度稀缺的医疗资源提供了契机.因此,如何利用好不同城市的感染错峰,协同调度好城市群内部的不同防疫人员及物资,使得各地的感染者需求与应急资源供给最大程度匹配,是从城市群管理视角提升疫情应急治理能力的关键所在.

传统城市群应急管理研究成果较多关注应急资源调度^[1]、应急医疗物资需求预测及物流选址-分配优化^[2]、应急物资公平配置^[3]等主题.为了更好地适应疫情发展的动态演变特征,学者们提出了多周期、多阶段的规划方案.如刘明等^[4]提出将整个规划时期分为多个决策周期,并采用 SIRED 传染病动力学模型预测未来多决策周期内的感染人数,建立动态的应急物流规划模型,确定疫情环境下的应急设施选址与应急物资分配方案;魏宇琪等^[5]基于应急物资生命周期有限,研究应急物资横向转运的协同预备策略.为了最大限度地提升应急救援效率,学者们也探索了考虑多维修队协同策略的灾后路网修复调度与路由联合优化模型^[6],将马尔科夫链纳入抢修队与运输队联合调度的路网模型^[7],同时考虑医疗捐赠资源、救护车运输资源分配以及患者转运决策^[8],将不同年龄结构的感染患者协同分配到多类型的医疗机构^[9]等.从文献检索结果看,目前还鲜有学者从感染错峰的角度,研究重大突发公共卫生事件中的应急资源跨区域协同调度问题.特别地,Zhou 等^[10]围绕重大突发公共卫生事件暴发初期应急物资调度的现实需求,提出了疫情核心区互救与外部救助相结合的应急物资协同调度模式,构建了融合非常规疫情动态演化和政府响应行为的应急物资协同优化模型;Zhang 等^[11]针对跨区域疫情暴发时检测资源与治疗资源的联合配置存在时滞相关性,提出了检测和治疗资源联合分配模型;Luo 等^[12]研究了流行病背景下应急物资和感染患者跨区域综合管理问题,构建了多时段选址-分配模型以部署应急医院、单区域分配应急物资以及跨区域转运患者.然而,这些学者尚未从感染错峰的角度,同时考虑应急选址、应急物资跨区域协同转运,以及医护人员跨区域协同支援的多周期集成优化问题.

与现有研究相比,本文研究的主要创新如下:1) 感染错峰的角度.利用不同区域感染达峰时间不同,将应急资源跨区域协同错峰调度问题刻画为混合整数规划.2) 兼顾应急成本和患者需求满足率.本

规划模型目标函数同时考虑患者需求满足率和应急成本.3) 耦合集成优化.模型同时考虑应急选址、应急物资跨区域协同转运、医护人员跨区域协同支援3方面的交互决策.4) 异质性特征.模型充分考虑应急资源调度过程中的多重异质性,包括不同患者类型、不同医院类型、不同医护人员类型、不同应急物资种类等.5) 可拓展性.模型具有很好的通用性和可拓展性,未来可用于其他重大突发公共卫生事件的应急资源调度.

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

本文所构建的重大突发公共卫生事件应急资源跨区域协同错峰调度模型如图1所示.研究背景设定在重大突发公共卫生事件暴发高峰期,但不同区域疫情严重程度有所差异,感染人数达到峰值的时间也不同,对于应急资源的需求程度和供给能力也不同.基于感染错峰的应急资源协同调度的内涵在于,从感染错峰的角度切入最大限度地匹配应急资源的需求与供给.因此,决策者主要关注哪些区域应急资源富余,哪些区域应急资源紧缺,决策重点在于什么时间段将富余的应急资源错峰转运至最需要应急资源的区域,以及支援应急资源的数量多少等问题.

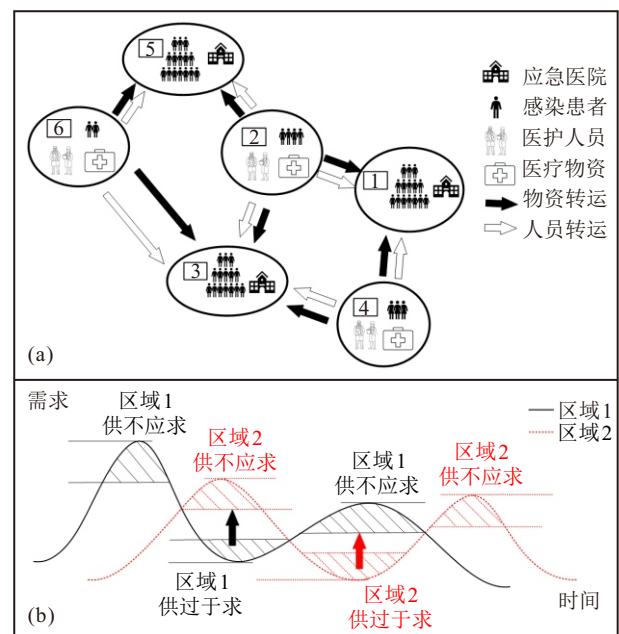


图1 应急资源跨区域协同错峰调度示意图

如图1(a)所示:区域1、区域3、区域5的感染者数目临近达峰,为高风险区域,短时间内医疗资源不足;同时,区域2、区域4、区域6的感染者未达峰,为低风险区域,具有富余的应急医疗资源.因而,可将低风险感染区域的医护人员和应急医疗物资等应

急资源转运至高风险感染区域,以最大限度地救治感染患者,形成跨区域一体化协同应急模式。图1(b)形象地展示了感染错峰调度的具体含义。在疫情感染的背景下,同一区域在不同时段需求峰谷不同,处于需求高峰期时供不应求,处于需求低谷期时供过于求。感染错峰调度的本质在于不同时段下供大于求的区域为供不应求的区域提供应急资源的支援。因此,本文所讨论的感染错峰调度重点不在于传染病感染峰值,而是感染后应急资源的供需匹配,聚焦于资源协同错峰调配的决策。

高风险感染区域首先建立应急医院以收治感染患者,如果仍然不足以满足治疗需求,则低风险感染区域进行跨区域转运应急资源,以达到整体最大限度满足感染患者治疗需求的目标。假设每类不同的应急医院在每个地区至少建立一个,以应对重大突发公共卫生事件,但建立的时间需要进一步决策。感染患者检测由普通医院执行,并且当普通医院不足以满足收治感染病人的需求时,将患者分配到本区域的应急医院。

与以往的研究不同,本文主要针对重大突发公共卫生事件下多区域感染达峰时间不同而导致的应急资源供需不平衡问题,立足于应急医疗物资以及医护人员的多周期跨区域供给支援实践,考虑不同类型的感染者、医护人员、应急医疗物资、临时应急医院等多异质性因素,建立应急资源多周期跨区域协同调度混合整数规划模型。该模型为临时应急医院在何时何地选址,应急医疗物资和医护人员何时跨哪些区域进行转运支援,转运多少数量的应急医疗物资,支援多少医护人员等问题提供具体决策。

1.2 模型建立

目标函数 f 中包含未满足治疗需求的惩罚成本、应急医院固定建设成本、应急物资采购成本、物资转运成本、医护人员雇佣成本、医护人员转运成本,数学公式表述如下。

$$\min f = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \rho_k(t) \delta_{jk}(t) + \varepsilon \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \left(\sum_{\zeta \in \Omega} g_{j\zeta} x_{j\zeta}(t) + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} y_{ijq}(t) (\beta_q + \theta'_{ij}) + \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} z_{ijr}(t) (h_r + \theta''_{ij}) \right).$$

其中: ε 是医院总运营成本相对权重; $\rho_k(t)$ 是第 t 周期 k 型感染者未被治疗的单位惩罚成本系数; $g_{j\zeta}$ 是 j 区域 ζ 类医院的固定成本; β_q 是 q 类物资采购成本; h_r 是雇用 r 类医护人员的成本; θ'_{ij} 是物资从 i 区域转运到 j 区域的单位转运成本; θ''_{ij} 是医护人员从 i 区域

转运到 j 区域的单位转运成本; $x_{j\zeta}(t)$ 是 0-1 决策变量,第 t 周期 j 区域 ζ 类医院是否建立选址; $y_{ijq}(t)$ 是决策变量,第 t 周期从 i 区域转运到 j 区域医院的 q 类物资量; $z_{ijr}(t)$ 是决策变量,第 t 周期从 i 区域转运到 j 区域医院的 r 类医护人员数量; $\delta_{jk}(t)$ 是状态变量,第 t 周期 j 区域已确诊的 k 型患者但未及时转运到医院治疗的患者数。

1) 应急医院相关约束。

$$\sum_{\tau=1}^t x_{j\zeta}(\tau) \leq 1, \forall j \in J, \zeta \in \Omega, t \in T; \quad (1)$$

$$\eta_{ij\zeta}(t) \leq \sum_{\tau=1}^t x_{j\zeta}(\tau), \quad \forall i \in I, j \in J, \zeta \in \Omega, t \in T; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \eta_{ij\zeta}(t) \geq 1, \forall j \in J, \zeta \in \Omega; \quad (3)$$

$$\varphi_{ij\zeta k}(t) = \sum_{t' \in T: t' \leq t} \Gamma_{k\zeta} \eta_{ij\zeta}(t'), \quad \forall i \in I, j \in J, \zeta \in \Omega, k \in K, t \in T; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} z_{ijr}(t) \leq \sum_{i \in I} \sum_{\zeta \in \Omega} \sum_{k \in K} M_1 \varphi_{ij\zeta k}(t), \quad \forall j \in J, t \in T; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} y_{ijq}(t) \leq \sum_{i \in I} \sum_{\zeta \in \Omega} \sum_{k \in K} M_2 \varphi_{ij\zeta k}(t), \quad \forall j \in J, t \in T; \quad (6)$$

$$\sigma_{jk}(t) \leq \sum_{i \in I} \sum_{\zeta \in \Omega} M_3 \varphi_{ij\zeta k}(t), \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T. \quad (7)$$

式(1)表示如果在 t 个决策周期内决定在 j 区域选址建立 ζ 类应急医院,则这类应急医院建立后可以一直使用至整个规划期结束,不需要重复建立。式(2)表示只有当应急医院选址建立才能服务来自其他区域的支援或者转运。式(3)表示对于区域 j 的每个应急医院至少接受一次转运。式(4)表示每个应急医院的服务状态。只有当感染者类型和应急医院类型相匹配,即轻症患者被转运至轻症医院,重症患者被转运至重症医院时,对应类型的应急医院才处于服务患者状态,否则不处于服务状态。本文考虑的应急医院并非常规医院,而是针对特定感染者方舱医院。式(5)表示只有当医院处于服务状态时医护人员才可以被跨区域分配过来。式(6)表示只有当医院处于服务状态时医疗物资才可以被跨区域转运过来。式(7)表示只有当医院处于服务状态时患者才可以被分配过来。其中: $\eta_{ij\zeta}(t)$ 是 0-1 决策变量,第 t 周期 ζ 类医院是否接受从 i 区域到 j 区域跨区域的转运或

支援; $\varphi_{ij\zeta k}(t)$ 是 0-1 决策变量, 第 t 周期从 i 区域转运到 j 区域的 k 型患者是否被 ζ 类应急医院服务; $\Gamma_{k\zeta}$ 是指示符号, 如果 k 型感染者与 ζ 型应急医院相匹配则为 1, 否则为 0; M_1 、 M_2 、 M_3 为大数; $\sigma_{jk}(t)$ 是状态变量, 第 t 周期 j 区域应急医院被分配的 k 型患者数量.

2) 患者相关约束.

$$\sigma_{jk}(t) + \delta_{jk}(t) = p_{jk}(t) + \sum_{k' \in K} \delta_{jk'}(t-1) \xi_{k'k},$$

$$\forall j \in J, k \in K, t \in T : t \neq 1; \quad (8)$$

$$\sigma_{jk}(t) + \delta_{jk}(t) = p_{jk}(t), \forall j \in J, k \in K, t = 1; \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sigma_{jk}(t) \leq \sum_{\zeta \in \Omega} \sum_{t \in T} c_{j\zeta} x_{j\zeta}(t), \forall j \in J. \quad (10)$$

式 (8) 和 (9) 表示跨时段感染患者流平衡约束; 式 (10) 表示入院治疗的患者应满足医院接受患者的容量限制. 其中: $p_{jk}(t)$ 是第 t 周期 j 区域新增 k 型感染者的数量; $\xi_{k'k}$ 是不同类型的患者转换率, 轻症 (重症) 症状加重 (减轻) 转为重症 (轻症); $c_{j\zeta}$ 是 j 区域 ζ 类医院可治疗患者的最大容量.

3) 应急医疗物资相关约束.

$$\sum_{i \in I} y_{ijq}(t) \geq \sum_{\zeta \in \Omega} \psi_{j\zeta q} x_{j\zeta}(t),$$

$$\forall j \in J, q \in Q, t \in T; \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sigma_{jk}(t) a_{kq}(t) + \sum_{r \in R} \lambda_{jr}(t) d_{rq}(t) + \mu_{jq}(t) =$$

$$\sum_{i \in I} y_{ijq}(t) + \mu_{jq}(t-1),$$

$$\forall j \in J, q \in Q, t \in T : t \neq 1; \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sigma_{jk}(t) a_{kq}(t) + \sum_{r \in R} \lambda_{jr}(t) d_{rq}(t) + \mu_{jq}(t) =$$

$$\sum_{i \in I} y_{ijq}(t), \forall j \in J, q \in Q, t = 1; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ijq}(t) \leq nq_q(t), \forall q \in Q, t \in T. \quad (14)$$

式 (11) 表示应急医院的应急医疗物资基础配置需要满足本区域感染未达峰时患者对医疗物资的基础需求. 基础配置指的是, 为了满足未达峰前收治感染者需求, 本区域内部分配给应急医院的基础医疗资源. 本文所考虑的应急医疗物资为口罩和防护服, 因而应急医疗物资需求量不仅仅与患者数量有关, 也与医护人员数量有关. 式 (12) 和 (13) 表示跨时段应急医疗物资流平衡约束. 式 (14) 表示每一时段应急医疗物资最大供给数量限制. 其中: $\psi_{j\zeta q}$ 是 j 区域 ζ 类医院 q 类物资的基础需求量; $a_{kq}(t)$ 是第 t 周期每个 k 型患者的 q 类物资需求量; $d_{rq}(t)$ 是第 t 周期每个

r 类医护人员的 q 类物资需求量; $\lambda_{jr}(t)$ 是状态变量, 第 t 周期 j 区域医院 r 类医护人员预备数量; $\mu_{jq}(t)$ 是状态变量, 第 t 周期 j 区域医院 q 类物资供给库存量; $nq_q(t)$ 是第 t 周期可新增 q 类物资的最大数量.

4) 医护人员相关约束.

$$\sum_{i \in I} z_{ijr}(t) \geq \sum_{\zeta \in \Omega} l_{j\zeta r} x_{j\zeta}(t), \forall j \in J, r \in R, t \in T; \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \frac{\sigma_{jk}(t) b_{kr}}{w_r(t)} + \lambda_{jr}(t) = \sum_{i \in I} z_{ijr}(t) + \lambda_{jr}(t-1),$$

$$\forall j \in J, r \in R, t \in T : t \neq 1; \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} \frac{\sigma_{jk}(t) b_{kr}}{w_r(t)} + \lambda_{jr}(t) = \sum_{i \in I} z_{ijr}(t),$$

$$\forall j \in J, r \in R, t = 1; \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ijr}(t) \leq nr_r(t), \forall r \in R, t \in T. \quad (18)$$

式 (15) 表示应急医院的医护人员基础配置需要满足本区域感染未达峰时患者对医护人员的基础需求, 式 (16) 和 (17) 表示跨时段医护人员流平衡约束, 式 (18) 表示每一时段医护人员最大支援数量限制. 其中: $l_{j\zeta r}$ 是 j 区域 ζ 类医院 r 类医护人员的基础需求量, b_{kr} 是 r 类医护人员服务 k 型患者的时长, $w_r(t)$ 是第 t 周期 r 类医护人员工作时间, $nr_r(t)$ 是第 t 周期可新支援 r 类医护人员的最大数量.

5) 变量相关约束.

$$x_{j\zeta}(t), \eta_{ij\zeta}(t), \varphi_{j\zeta k}(t) \in \{0, 1\},$$

$$\forall i \in I, j \in J, \zeta \in \Omega, k \in K, t \in T; \quad (19)$$

$$\sigma_{jk}(t), y_{ijq}(t), z_{ijr}(t), \mu_{jq}(t), \lambda_{jr}(t), \delta_{jk}(t) \geq 0,$$

$$\forall i \in I, j \in J, r \in R, q \in Q, k \in K, t \in T. \quad (20)$$

式 (19) 和 (20) 表示 $x_{j\zeta}(t)$ 、 $\eta_{ij\zeta}(t)$ 、 $\varphi_{j\zeta k}(t)$ 为 0-1 变量, 其余变量为非负且连续.

上述模型为混合整数线性规划模型, 采用 Python 调用 Gurobi 的分支定界算法和切割直接求解.

2 社会计算实验分析

2.1 基础结果分析

为验证模型的有效性, 本文以长三角重点城市群为背景进行社会计算实验, 时间跨度设置为 8 周. 参数值来源于国家卫生健康委员会、疾控中心、统计局等机构以及相关的期刊论文. 实验结果如图 2 和图 3 所示.

本文应急医院选址决策表示在某一周期选址之后可以一直投入使用, 不需要重新选址. 不同的区域

| 选址区域 | 周期1 | 周期2 | 周期3 | 周期4 | 周期5 | 周期6 | 周期7 | 周期8 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $j=1$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=1$ $f=SH$ | | | | | | | | |
| $j=2$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=2$ $f=SH$ | | | | | | | | |
| $j=3$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=3$ $f=SH$ | | | | | | | | |
| $j=4$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=4$ $f=SH$ | | | | | | | | |
| $j=5$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=5$ $f=SH$ | | | | | | | | |
| $j=6$ $f=MH$ | | | | | | | | |
| $j=6$ $f=SH$ | | | | | | | | |

图2 应急医院选址决策

根据本地疫情严重程度分阶段建立应急轻症医院和重症医院.从图2中可以看出:区域2和区域6在第1周期同时建立了轻症医院和重症医院;区域3和区域4均是在第1周期建立重症医院,随后第2周期建立轻症医院;区域1和区域5重症医院和轻症医院的建立均间隔了2个周期.

总体而言,优先建立重症医院,其次再建立轻症医院.这是由于重症患者通常病情较为严重,需要紧急救治和更多的医疗资源支持.因此,在资源有限的情况下,优先给予重症患者治疗,可以提高救治效果和生存率.同时,优先治疗重症患者也符合人道主义原则,可以最大程度地减少病人的痛苦和伤害.

图3以第2和第8周期为例展示从*i*区域转运

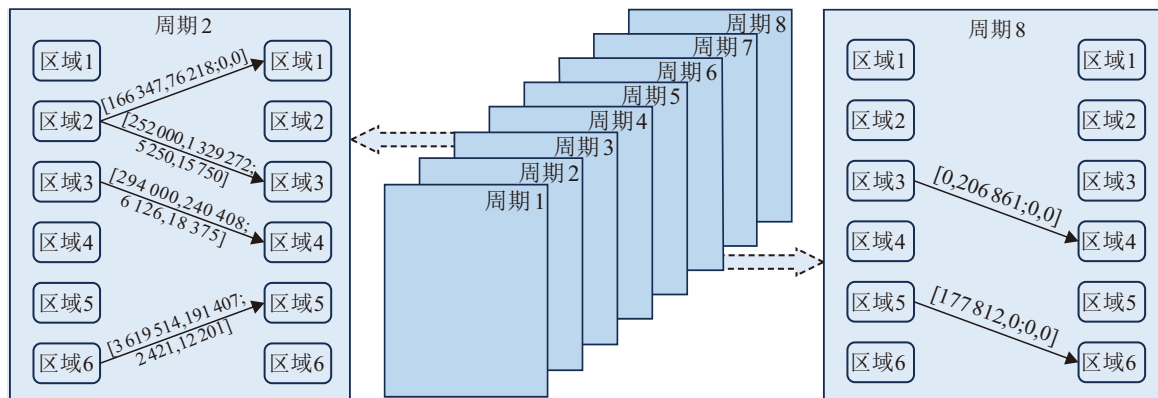


图3 协同转运决策

到*j*区域医院的*q*类应急物资量和*r*类医护人员数量.从图中可以看出:第2周期时,区域6对区域5进行应急医疗资源转运支援,区域6向区域5支援了3619514只口罩和191407件防护服,转运了2421名医生和12201名护士;第8周期时,区域5对区域6进行应急支援,区域5向区域6转运支援了177812只口罩.说明了第2周期区域6对应急资源需求量较小,具有富余的应急资源,而区域5累计感染者较多,对应急资源需求量较大,供给相对不足,此时将区域6相对富余的应急资源用于供给区域5;第8周期时区域6和区域5应急资源需求供给恰恰相反,区域5对区域6进行“反哺式”应急支援.这不仅充分体现了应急资源的需求量错峰协同调度思想,更显示了“一方有难,八方支援”的社会主义制度优越性.

图4以第4周期和第6周期为例展示了*j*区域应急医院被分配的*k*型患者数量、*q*类应急物资供给库存数量、*r*类医护人员预备数量,以及*j*区域已确诊的*k*型患者但未及时转运到医院治疗的患者数.以图中第4周期区域5为例,可以看出该区域应急医院被分配了2371位轻症患者,592位重症患者,未入院治疗的轻症患者有766位,未入院治疗的重症患者有191位,口罩库存有2933549只,防护服库存

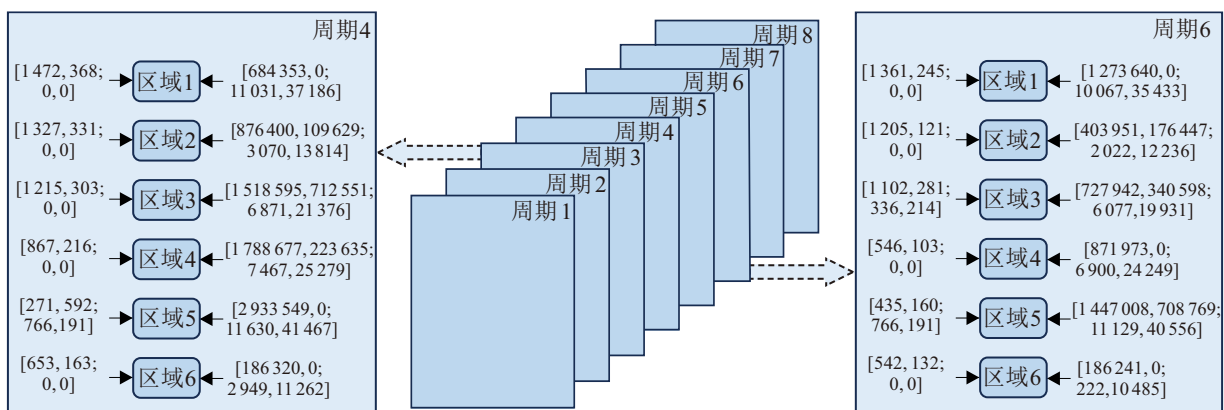


图4 状态变量结果展示

短缺, 预备医生有 11630 位, 预备护士有 41467 位。

2.2 应急成本关注度影响分析

随着传染病的不断蔓延, 如何有效地管理未接受治疗的感染者所带来的风险和防控成本, 是卫生管理部门面临的一个重要问题。未接受治疗的感染者可能导致病毒传播风险增加、医疗资源压力增大等。本文通过惩罚成本量化未接受治疗的感染者所带来的风险, 进而衡量其与总运营成本之间的权衡关系。将相对权重 ε 分别设置为 0.05、0.1、0.5、1、5、10, 分析不同权重下感染者需求未满足率以及各项成本的变化趋势, 以寻求接受治疗的感染者数带来的风险与总运营成本的平衡点, 为决策者提供科学依据, 具体结果如图 5 所示, 其中感染者需求未满足率为未接受治疗的感染者数与总感染者数的比值。

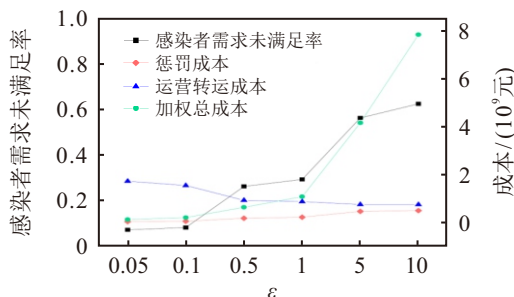


图5 总运营成本相对权重的影响

图 5 显示了随着总运营成本相对权重不断增加, 感染者需求未满足率、惩罚成本不断增加, 加权总成本不断增大且曲线斜率较大, 运营转运成本逐渐减小且曲线斜率较小。由此说明: 当决策者更关注运营成本的目标时, 虽然转运成本有所降低, 但是感染患者未满足率大幅度上升, 未接受治疗的感染者变多, 加权总成本反而大幅度增加, 总体而言疫情防控处置效果较差; 反之, 当总运营成本相对权重不断减小时, 感染者需求未满足率、惩罚成本、加权总成本不断减小, 运营转运成本逐渐增加但曲线斜率较小。

由此可以看出, 当决策者减弱关注运营成本权重, 增加对感染者满足率的关注时, 感染者需求未满足率降低, 疫情防控处置效果较为显著。如果策略选择更关注疫情应急救援所需的巨大成本, 从而最终导致感染者医治满足率较低, 社会面感染人数增多, 疫情蔓延较为严重; 与之相比, 如果策略选择更关注感染者满足率, 那么更多的患者得到妥善治疗, 社会面感染人数较少, 疫情蔓延逐步减缓。因此, 在对某种新发突发传染病不甚了解的情况下, 成本不该是决策者关注的重点, 患者的需求满足率才是首要的考虑因素, 这也有效地印证了我国在重大突发公共卫生事件早期实施“应收尽收、应治尽治”策略

的正确性。

2.3 患者与医院匹配策略影响分析

实施分级诊疗是应对重大突发疫情的一项关键措施。重症患者通常需要高水平的治疗, 包括监护室设备、专业医生和护士团队等, 而轻症患者可能只需要一些基本的医疗支持和观察, 在轻症应急医院即可满足, 同时避免占用重症应急医院稀缺医疗资源。然而, 当应急医疗资源较为紧缺, 无法满足感染者类型与医院类型完全匹配时, 何种匹配策略更优? 基于此, 本文设置 4 种匹配策略, 包括完全匹配策略 Γ_1 (指轻症重症感染者完全对应匹配到同类型的医院)、轻症宽松匹配策略 Γ_2 (指轻症患者可以匹配至轻症和重症医院, 重症患者只能匹配重症医院)、重症宽松匹配策略 Γ_3 (指重症患者可以匹配至轻症和重症医院, 轻症患者只能匹配轻症医院)、完全宽松匹配策略 Γ_4 (指不同类型的患者可以任意匹配医院)。在此基础上, 分析不同策略下感染者需求未满足率以及各项成本的变化趋势, 具体结果如图 6 所示。

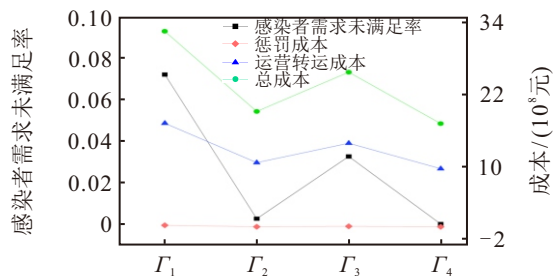


图6 不同匹配策略的影响

图 6 显示完全匹配的 Γ_1 策略的感染者需求未满足率及各项成本均高于其他 3 种策略, 这说明在实践中要做到完全的分级诊疗不仅需要付出较大的代价, 而且这种策略缺乏弹性。如果单纯从优化的角度而言, 完全宽松匹配 Γ_4 策略的感染者需求未满足率最低, 各项成本也是最低, 但这种方案也导致分级诊疗失去它应有的作用。轻症宽松匹配策略 Γ_2 是次优选择, 却是实践中的满意方案, 在这个策略中, 重症患者只能匹配重症医院, 借助专业的设备、医生保障生命, 轻症患者匹配至轻症医院, 在重症医院有空余的情况下可匹配至重症医院, 从而增加了策略的弹性。这一研究结论也印证了科学决策遵循满意准则而非最优原则。

2.4 应急物资量上限影响分析

在应对重大突发公共卫生事件时, 充足的应急物资供应是疫情防控工作关键。本文以应急物资最大量 $nq_q(t)$ 为基础, 分别将其乘以 0.01、0.05、0.1、0.5、1、5, 分析不同应急物资量上限对感染者需求未

满足率以及各项成本的影响,具体结果如图7所示.

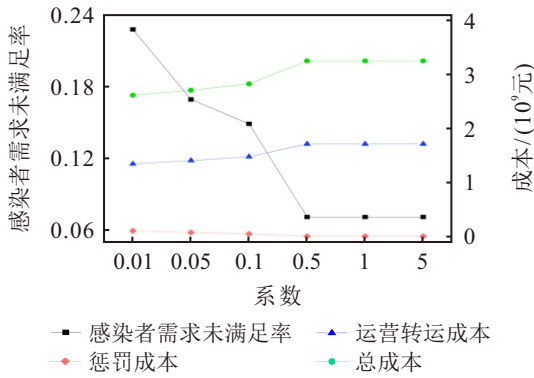


图7 应急物资量上限的影响

图7显示:随着应急物资量上限的增加,运营转运成本逐渐增加,感染者需求未满足率不断下降,惩罚成本不断下降;当上限提升到一定程度时,运营转运成本和总成本不再增加,感染者需求未满足率和惩罚成本不再下降,惩罚成本不再下降.由此可知,应急物资量上限具有阈值效应.在阈值范围之内提升应急物资上限,有助于提高感染患者需求满足率,降低总应急成本;但是超出阈值范围之后,继续增加应急物资上限,疫情防控效果却保持不变.

2.5 医护人员数上限影响分析

与上述敏感性分析类似,本文以医护人员最大量 $nr_r(t)$ 为基础,分别将其乘以0.5、1、2、4分析不同医护人员数上限对感染者需求未满足率及各项成本的影响,具体结果如图8所示.

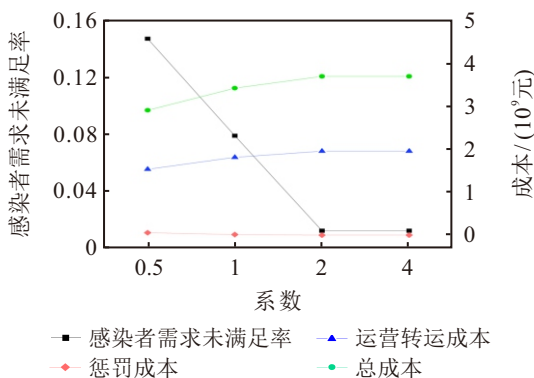


图8 医护人员数上限的影响

图8显示:随着医护人员数上限增加,运营转运成本将有所增加,感染者需求未满足率大幅度下降,惩罚成本逐渐下降;但是当上限提升到基础值的2倍时,感染者需求未满足率以及各项成本均保持不变.由此可知,医护人员数上限也具有阈值效应.在阈值范围之内,提高医护人员数上限能有效提高感染患者需求满足率,降低应急成本;但当医护人员数上限超出阈值范围后,继续加大投入,需求满足率和成本依然保持不变.

2.6 医院容量影响分析

应急医院容量是指应急医院可以同时接收和治疗的患者的数量.合理规划和提高应急医院的患者容量,能够有效控制感染人数,为突发公共卫生事件的应对提供保障.本文以医院容量 c_{jf} 为基础,分别将其乘以0.01、0.05、0.1、0.5、1、5,分析不同医院容量对感染者需求未满足率及各项成本的影响,具体结果如图9所示.

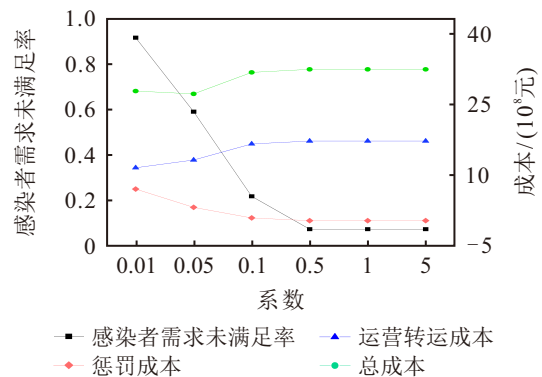


图9 医院容量的影响

图9显示:随着医院容量不断增加,运营转运成本不断上升,感染者需求未满足率大幅度下降,惩罚成本逐渐下降.从曲线斜率来看,运营转运成本、感染者需求未满足率、惩罚成本、总成本4者的曲线斜率绝对值均随着医院容量的增大而由大变小.由此说明:医院容量同样存在阈值效应,当医院容量较低时,扩大容量则疫情防控效果较为显著;当医院容量超过一定阈值时,扩大容量并不能进一步提升防控效果.如2020年2月初武汉决定建13家方舱医院,2月21日当地又决定再建19家方舱医院,而2月18日之后,武汉的疫情形势已基本得到控制,后续新增感染人数逐渐减少,因此后续第2批这19家方舱医院建设是没有必要的.实际情况是,武汉最终建设方舱医院16家,床位总量12666张^[13],与本文研究结论基本一致.

3 结论

本文围绕重大突发公共卫生事件涉及的多个感染区域之间应急资源供需不平衡问题,构造以总应急成本和感染者需求未满足率最小为目标的应急资源跨区域协同调度模型.在每个决策周期中,蕴含了应急医院选址、应急物资跨区域转运、医护人员跨区域支援3个交互耦合的决策过程.该研究的理论贡献和实践价值主要包括:1)不同于传统的各疫区“自扫门前雪”式救援,本文基于感染错峰思想提出了“一方有难,八方支援”式跨区域应急协同调度方法,更加符合中国的国情.2)传统的应急资源调度模型鲜有对应急资源和感染者进行细分,导致不同类型

的应急资源和不同程度的感染者被无差别同等对待. 本文将感染者和医院都细分为轻症和重症, 并考虑了应急物资和医护人员的异质性. 3) 深入讨论了应急成本关注度、患者与医院匹配策略、应急物资量上限、医护人员数上限、医院容量等因素对疫情演化的影响, 研究结果可为重大突发公共卫生事件应急救援提供决策支撑.

本文的研究仍存在一些局限性, 主要包括: 1) 并未考虑疫情实时信息更新对参数变动的的影响, 未来可采用疫情实际数据动态更新参数取值, 建立数据驱动的应急资源跨区域协同调度模型; 2) 缺乏对需求的不确定性的考虑, 可以进一步引入随机规划刻画重大突发公共卫生事件下的应急资源需求; 3) 只调用了 Gurobi 进行模型求解, 未来可以根据应急资源跨区域协同调度问题的特性设计定制的 Benders 分解算法提高求解效率.

参考文献 (References)

- [1] 郭鹏辉, 朱建军, 王嵩华. 考虑异质物资合车运输的灾后救援选址-路径-配给优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(9): 2345-2360.
(Guo P H, Zhu J J, Wang H H. Location-routing-allocation problem with consolidated shipping of heterogeneous relief supplies in post-disaster rescue[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2019, 39(9): 2345-2360.)
- [2] 罗治洪, 李婷. 数据驱动下应急医疗物资需求预测及物流选址-分配优化[J]. *控制与决策*, 2024, 39(9): 3117-3125.
(Luo Z H, Li T. Data-driven demand forecast for emergency medical supplies and logistics location-allocation optimization[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(9): 3117-3125.)
- [3] 郑斐峰, 陈克政, 刘明. 突发疫情下基于机会约束的应急医疗设施建设选址与公平配置优化[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2783-2790.
(Zheng F F, Chen K Z, Liu M. Optimization of construction site selection and fair allocation of emergency medical facilities based on chance constraint under sudden epidemic situation[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2783-2790.)
- [4] 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(2): 437-448.
(Liu M, Cao J, Zhang D. Dynamic adjustment method for optimizing epidemic-logistics network based on data-driven[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2020, 40(2): 437-448.)
- [5] 魏宇琪, 杨敏, 梁樑. 基于生命周期的模块化应急物资联动预储研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(4): 979-994.
(Wei Y Q, Yang M, Liang L. Lateral-transshipment and pre-positioning strategy research of relief modularization based on material's limited shelf life[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2021, 41(4): 979-994.)
- [6] 谭晓燕, 毛新华, 周继彪, 等. 考虑多维修队合作策略的灾后路网修复调度与路由联合优化[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4151-4159.
(Tan X Y, Mao X H, Zhou J B, et al. Joint optimization of scheduling and routing in post-disaster road network repair considering multi-crew cooperation [J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 4151-4159.)
- [7] 张国富, 朱前顺, 苏兆品, 等. 基于双层交互 Q 学习的路网抢修和物资配送联合调度 [J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4109-4117.
(Zhang G F, Zhu Q S, Su Z P, et al. Joint scheduling of road network restoration and emergency relief supplies delivery based on double-layer interactive Q-learning[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 4109-4117.)
- [8] Anparasan A, Lejeune M. Resource deployment and donation allocation for epidemic outbreaks[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 283(1): 9-32.
- [9] Hosseini-Motlagh S M, Samani M R G, Homaei S. Design of control strategies to help prevent the spread of COVID-19 pandemic[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(1): 219-238.
- [10] Zhou L, Huang P, Dai Y, et al. Research on coordinated dispatching of emergency materials in the initial stage of outbreak epidemic with the coupling of regional mutual rescue and external rescue[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(8): 297-307.
- [11] Zhang H P, Zhou W H, Sun Y J. Joint allocation of emergency medical resources with time-lag correlation during cross-regional epidemic outbreaks[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 164: 107895.
- [12] Luo L, Wan X Y, Wang Q Y. A multi-period location-allocation model for integrated management of emergency medical supplies and infected patients during epidemics[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 173: 108640.
- [13] 杜丽敬, 夏翔, 应焕钦, 等. 重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应问题及对策[J]. *中国科学基金*, 2020, 34(6): 683-692.
(Du L J, Xia X, Ying H Q, et al. Problems and countermeasures of medical material supply in major public health emergencies[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34(6): 683-692.)

作者简介

开吉 (1995-), 男, 博士生, 主要研究方向为应急协同优化调度, E-mail: jeffery@njust.edu.cn;

张淑华 (1995-), 女, 博士生, 主要研究方向为资源配置优化, E-mail: S.H.Zhang@njust.edu.cn;

刘明 (1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为应急物流, E-mail: liuming@njust.edu.cn;

曹杰 (1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为管理系统工程, E-mail: ci@amss.ac.cn.