考虑社会捐赠的疫情应急预算分配优化研究

朱晓宵1, 刘明1*, 杜雨芮1, 曹杰2

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

摘要: 突发公共卫生事件暴发后,如何结合疫情的传播扩散规律,科学合理地分配应急预算资金,是提升应急救援效率和应急治理能力的重要保障。基于此,本文首先结合疫情传播特征构建 SEIHRD 系统动力学模型用于刻画突发公共卫生事件的演化规律,然后通过对社会公众向当地红十字会捐款数据的拟合,构建突发公共卫生事件下的社会捐款函数;在此基础上,以未能入院接受治疗的感染人数最少为目标,综合考虑政府固定预算与社会捐款,构建总额可变环境下的应急预算分配混合整数非线性规划模型。算例测试结果表明,社会捐款在疫情应急响应中发挥着重要的作用,而总体应急预算投入则存在边际效用递减效应;随着总应急预算投入的增加,应急预算的分配逐渐趋于稳定;对疫情越早干预效果越好,每推迟一周所需的应急投入成倍增加;此外,控制医疗资源挤兑行为、平稳医疗服务价格,对控制疫情的发展同样有着非常重要的作用。

关键词:突发公共卫生事件;社会捐赠;应急管理;资源分配;系统优化
中图分类号:C 931.1 文献标识码:A 文章编号:1004-6062(2024)01-0242-011
DOI: 10.13587/j. cnki. jieem. 2024. 01. 018

0 引言

突发公共卫生事件不仅严重危害人类健康和生 命安全,同时也会对全球经济发展造成重创,如截至 2022年1月7日,新冠疫情导致全球 300838232人确 诊,5485853人死亡[1]。与此同时,世界银行发布的 《世界经济展望》报告显示,该突发公共卫生事件导 致 2020 年全球经济萎缩 4.3%^[2]。这次突发公共 卫生事件暴发后,党和国家第一时间快速响应,先 后投入了大量的人力物力财力用于武汉应急救援 响应。全球也积极向当地红十字会捐款捐物,其中 捐款总数达17.48亿元,这些社会捐赠在疫情防控 阻击中发挥着重要作用。但同时我们也关注到,早 期由于缺乏科学有效的应急预算分配方法指导,社 会捐赠分配不均、乱象丛生,引发网络舆论的强烈 不满^[3]。因此,突发公共卫生事件暴发后,如何结 合疫情传播扩散规律,科学合理地分配应急资源 (本文主要指应急预算资金,社会捐赠物资也可进 行折算),则成为学术界亟须解决的一个重要科学 问题。

疫情传播扩散规律的刻画是科学决策的首要 步骤,而传染病动力学模型是疫情扩散演化建模最 有效的手段。国内外学者们常采用 SIR 模型^[4]、 SEIR 模型^[5]、SEIRD 模型^[6]、SE(Is)(Ih)AR 模 型^[7]、SRPISHR 模型^[8]等对疫情的扩散演化过程进 行建模分析。此外,也有学者将传染病动力学模型 与其他模型进行结合,如盛华雄等^[9]运用 SIR 模型 和差分递推方法及 Logistic 模型对疫情不同阶段的 传播行为进行建模分析。Yang 等^[10]将 SEIR 模型 与人工智能(AI)结合,对疫情的发展趋势进行预 测。Chang 等^[11]构建了一个集成细粒度与动态移 动网络的 SEIR 模型,模拟疫情在美国十大都市地 区的传播规律。这些传染病动力学模型为本文研 究提供了很好的理论参考。

应急资源分配是突发疫情环境下政府决策的 重要内容,对疫情发展趋势有着重要影响。关于应 急资源优化分配,现有研究成果大多针对自然灾害 等应急环境,基于有限应急资源约束设计单/多目 标规划模型,从而得到最佳的分配方案^[12-14]。与自 然灾害环境不同,突发疫情环境下的应急资源配置 与疫情的扩散演化存在交互耦合作用关系,一方面 应急资源配置会影响疫情的未来演化趋势[15-16],另 一方面疫情的扩散演化趋势又会反过来影响应急 资源的优化配置[17-19],因此需要将疫情扩散演化与 应急资源分配进行整合,构建考虑交互耦合作用的 疫情应急资源系统优化配置模型。在这一细分研 究方向上,近年来比较相关的研究如表1所示,其中 Büyüktahtakın 等^[20]构建了流行病-物流混合整数规 划模型,对埃博拉疫情中的隔离病床时空分配问题 进行研究:Liu 等^[21]对 Büyüktahtakın 等^[20]所提出的 模型从容量约束方面进行改进并将其应用于 H1N1

收稿日期: 2021-08-31

基金项目:国家自然科学基金项目(71771120、72171119);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21_0394) *通讯作者:刘明(1983—),男,江西金溪人;南京理工大学经济管理学院教授,博士生导师;研究方向:应急管理。 https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.018

表1 疫情应急资源优化配置相关文献比较

流感疫情防控;进一步地,刘明等^[22]基于数据驱动 的思想构建了疫情应急物流网络动态调整优化模 型;王付宇等^[23]从公平性角度考虑,构建了灾后应 急资源分配的多目标调度优化模型; 葛洪磊和刘 南^[24]则利用多周期贝叶斯序贯决策模型对疫情环 境下的应急物资分配问题进行了研究。

Table 1 Comparison of literature on optimal allocation of epidemic emergency resources				
参考文献	传染病动力学模型	优化目标	模型/方法	求解算法
朱莉和曹杰 ^[15]	SIR 模型	广义应急成本最小	三层应急调配网络模型	修正投影梯度算法
Ekici 等 ^[16]	SEI _P I _A I _S I _H RD 模型	总成本最小	混合整数线性模型	启发式算法
Liu 和 Zhang ^[17]	SEIR 模型	药品供应链总运营成 本最小	FPEA 模型	CPLEX 编程
Dasaklis 等 ^[18]	改进的 SIR 模型	不合格产品总量最小	线性规划模型	R 语言线性规划工具包
Long 等 ^[19]	动态 SIR 模型	感染人数最小	两阶段模型	启发式、贪婪策略、短视线 性规划、近似动态规划算法
Büyüktahtakın 等 ^[20]	SITR-FB 模型	感染人数及感染后未 能住院治疗的死亡人 数最小	混合整数规划模型	CPLEX 编程
Liu 等 ^[21]	SEIHR-A 模型	总未满足需求最小	混合整数非线性规划 模型	CPLEX 编程
刘明等 ^[22]	SEIAR 模型	应急响应成本最小	0-1 混合整数非线性 规划	混合枚举搜索和遗传算法 结合
王付宇等[23]	SEIR 模型	时间满意度最大、所有 灾点物资满足程度方 差最小、总成本最小	多目标优化模型	多目标优化蜂群算法
葛洪磊和刘南 ^[24]	_	物资配置决策损失最 小、应急时间最短	多周期贝叶斯序贯决策 模型	MATLAB 编程
本文	SEIHRD 模型	未 治 疗 感 染 者 人 数 最小	混合整数非线性规划 模型	遗传算法

如表1所示,现有研究成果大多为考虑固定总额的疫情应急资源分配问题。事实上,突发疫情后,除了政府拨付的应急预算外,社会捐赠也是应急物资的重要来源之一,主要包括捐款与捐物两个方面。社会捐赠的应急物资响应迅速,但存在质量标准不统一及供应到达时间不确定等问题^[25-26];社会捐款则主要存在捐款分配及时性与合理性的问题。关于社会捐款的优化分配,Anparasan和 Legeune^[27]定义了捐款的优化分配框架,以确定捐款在指定用途的优先次序,其研究发现随着捐款金额的增加,所治疗患者数量的边际效益在递减。尽管社会捐赠在突发疫情应急救援中扮演着重要角色,然而现有研究中对其进行定量刻画的还鲜有报道。

基于此,本文考虑突发疫情环境下的政府固定 预算与社会捐款综合分配优化问题,构建总额可变 环境下的应急预算分配混合整数非线性规划模型, 为政府应急管理决策提供支持。与现有研究相比, 本文的主要理论贡献如下:(1)构建了 SEIHRD 系 统动力学模型,用于刻画突发疫情扩散演化轨迹; (2)结合当地红十字会公布的社会捐款数据,拟合 了社会捐款函数并将其融合到可变的应急预算总额中;(3)综合传染病动力学模型与应急资源分配 优化模型,以未能住院接受治疗的感染人数最少为 优化目标,构建总额可变的应急预算分配优化模 型,有效地刻画了应急资源配置与疫情扩散演化之 间的交互耦合作用关系。值得说明的是,本文所设 计的应急决策框架具有非常好的可扩展性,可为其 他突发公共卫生事件(如流感、SARS、MERS、Ebola 等)的应急救援提供一个基础性的应急决策框架。

1 模型建立

1.1 基本假设

(1)本研究以2020年1月24日—2020年4月7日的疫情相关数据进行研究,规划期内不考虑人口的流入与流出;

(2)本文仅考虑隔离病床数量的变化对患者救 治的影响,未考虑人力、物资及其他资源限制等 因素;

(3)假设国家应急财政拨款一次性到位,不考 虑后期多次拨款的情况。

1.2 模型构建

本文所构建的模型同时考虑了疫情当前和未 来的变化情况以及不同预算分配情景对疫情发展 的影响,从而确定最佳的预算分配策略,以最大限 度地减少未能住院接受治疗的感染人数。模型的 构建过程主要包括变量定义、约束条件刻画、优化 模型构建三个部分。

(1) 变量定义

模型参数:

T:疫情持续的时间,t=0,1,2,…,T

η:新增隔离病床的固定成本

ζ:关闭隔离病床的固定成本

ω:隔离病床的单位运营成本

λ:患者住院治疗的单位治疗成本,其中主要包 括医护成本以及医药资源使用成本

 Ω : 政府分配的财政预算

β: 感染者的传播率

 δ : 暴露者转化为感染者的概率

μ: 感染者未住院接受治疗而死亡的比例

 φ : 感染者住院接受治疗后康复的比例

θ: 感染者住院接受治疗后仍然死亡的比例

N:疫情暴发区域的人口总数

C₀: 定点医院的初始病床数

s₀:初始时刻易感染者人数

 $e_0:$ 初始时刻暴露者人数

*i*₀:初始时刻感染者人数

h₀:初始时刻住院接受治疗的感染者人数

r₀:初始时刻康复者人数

d₀:初始时刻因病死亡人数

状态变量:

S(t):t 时刻易感染者人数

E(t):t时刻暴露者人数

I(t):t时刻感染者人数

I(*t*):*t*时刻感染后可以住院接受治疗的患者人数

H(t):t时刻正在住院接受治疗的患者人数

R(*t*):*t* 时刻康复者人数

D(t):t时刻因病死亡人数

C(t):t时刻的累计隔离病床数

J(t):t时刻的社会捐款

A(t):t 时刻的可用预算

X(t):t 时刻分配的治疗预算

决策变量:

C^k(t):t 时刻新增的隔离病床数量

C^{k'}(t):t 时刻关闭的隔离病床数量

(2) 疫情扩散约束

— 244 —

https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.018

基于传染病动力学理论,对疫情扩散演化过程 进行重建,构建了包括易感者(S)、暴露者(E)、确 诊患者(I)、住院接受治疗的患者(H)、康复者(R) 及因病死亡者(D)等仓室在内的 SEIHRD 模型,如 图 1 所示。



图 1 SEIHRD 传染病动力学模型 Figure 1 SEIHRD epidemic dynamics model

由于一般的传染病动力学模型为微分方程组, 很难获取其精确的解析解,更难以将其作为约束条 件融入应急资源分配优化模型。参照 Büyüktahtakın 等^[20]和 Liu 等^[21]的研究思路,当传染病动力学微分 方程组模型中的时间间隔 Δt 足够小时,可以将上述 SEIHRD 模型进行近似差分表示如下:

$$S(0) = s_0, E(0) = e_0, I(0) = i_0, H(0) = h_0,$$

$$R(0) = r_0, D(0) = d_0$$
(1)

$$S(t+1) = S(t) - \beta \frac{S(t)}{N(t)} I(t), \forall t \in T \setminus \overline{T} (2)$$

$$E(t+1) = E(t) + \beta \frac{S(t)}{N(t)} I(t) - \delta E(t), \forall t \in T \setminus \overline{T}$$

$$I(t+1) = I(t) + \delta E(t) - \overline{I}(t) - \mu I(t), \forall t \in T \setminus \overline{T}$$
(4)

$$H(t+1) = H(t) + \overline{I}(t) - \theta H(t) - \varphi H(t),$$

$$\forall t \in T \setminus \overline{T}$$
(5)

$$R(t+1) = R(t) + \varphi H(t), \forall t \in T \backslash \overline{T} \quad (6)$$

$$= D(t) + \mu I(t) + \theta H(t), \forall t \in T \setminus \overline{T}$$

$$N = S(t) + E(t) + I(t) + H(t) + R(t) + D(t),$$

$$\forall t \in T$$
(8)

D(t + 1)

上述差分后的各仓室状态变化具有很好的线 性特征,可以作为约束条件嵌入到应急资源分配优 化模型中。其中约束条件(1)是各类人群的初始状 态。约束条件(2)表示 t + 1 时刻的易感染者人数, 等于 t 时刻的易感染者人数,减去 t 时刻因接触感染 者而成为暴露者的人数;约束条件(3)表示 t + 1 时 刻的暴露者人数,等于 t 时刻的暴露者人数,加上 t 时刻因接触感染者而新增的暴露者人数,减去因发 病而成为感染者的人数;约束条件(4)表示 t + 1 时 刻的感染者人数,等于 t 时刻的感染者人数,加上 t 时刻由暴露者转化为感染者的人数,减去 t 时刻感 的人数;约束条件(5) 表示 t + 1 时刻住院治疗的患 者人数,等于 t 时刻住院治疗的患者人数,加上 t 时 刻新增的住院接受治疗的患者人数,减去 t 时刻死 亡的患者人数和康复的人数。约束条件(6) 表示 t + 1 时刻康复的人数,等于 t 时刻康复的人数,加上 t 时刻新增的康复人数。约束条件(7) 表示 t + 1 时刻 前死亡人数,等于 t 时刻死亡的人数,加上 t 时刻新 增死亡的人数。约束条件(8) 表示 t 时刻的总人数, 由于不考虑人口流动,因此总人数为固定值。

(3) 应急预算约束

疫情期间,当地红十字会^[28]从 2020 年 1 月 24 日开始公布社会捐款,具体如图 2 所示。截至 2020 年 4 月 7 日,共接受社会捐款 17.0199 亿元。假设 社会公众的捐款全部用于确诊患者的救治及隔离 病床的建设。基于每日捐款数据的变化趋势,本文 将其划分为四个阶段。考虑到数据的波动性,我们 对每个阶段数据采用平均弱化缓冲算子进行处理; 然后采用多项式拟合方法进行拟合,得到社会捐款 随时间的变化函数如式(9)所示。为了验证所构建 社会捐款函数的显著性,我们首先对函数拟合结果 与每日实际捐款数据进行统计检验,结果如表 2 所 示。统计检验的 *p* 值大于 0.05。进一步地,测算了 所构建分段函数的拟合精度 *R*² 分别为:0.9916、 0.9967、0.9538、0.9873,模型拟合精度较高,说明所 拟合的社会捐款函数能够有效刻画疫情期间的社 会捐款行为。



图 2 社会公众每日及累计捐款金额变化曲线



表 2 每日社会捐款实际值与函数拟合值配对 t 检验结果 Table 2 Paired t-test results between function fitted value of daily social donations and actual data

			双尾配对 t 检验	
_	实际值	拟合值	<i>t</i> 值	配对 t 检验-p 值
每日新增捐款	22505445, 80	22506054, 33	-0.016	0.987

$$J(t) = \begin{cases} 384290t^{2} - 1399100t + 119440000, \\ t \leq 10 \\ 245600(t - 10)^{2} - 4750900(t - 10) \\ + 35124000, \quad t \leq 20 \\ 2905(t - 20)^{2} - 125480(t - 20) \\ + 8107700, \quad t \leq 50 \\ - 1275(t - 50)^{2} - 17827(t - 50) \\ + 1541800, \quad 其他 \end{cases}$$
(9)

(4) 优化模型

基于上述约束条件,进一步构建总额可变的应 急预算分配优化模型如下:

$$in \sum_{t \in T} I(t) \tag{10}$$

$$C(t) = C_0 + \sum_{l=1}^{t} C^k(t) - \sum_{l=1}^{t} C^{k'}(t), \forall t \in T \setminus \{0, \overline{T}\}$$

m

(11)

— 245 —

$$\bar{I}(t) = \min\{C(t) - H(t), I(t)\}, \forall t \in T$$
(12)

$$X(t) = \eta C^{k}(t) + \zeta C^{k'}(t) + \omega C(t) + \lambda H(t),$$

$$\forall t \in T$$
(13)

$$A(t+1) = A(t) + J(t) - X(t), \forall t \in T \setminus \overline{T}$$
(14)

$$\sum_{t=1}^{T} X(t) \leq \Omega + \sum_{t=1}^{T} J(t), \forall t \in T \quad (15)$$

$$S(t), E(t), I(t), H(t), R(t), D(t) \ge 0, \forall t \in T$$

(16)

$$C^{k}(t), C^{k'}(t) \in Z, \forall t \in T \setminus \{0, \overline{T}\}$$
 (17)
上述优化模型中,目标函数(10)表示未能入院
接受治疗的感染人数尽可能少,这一目标函数较好
地满足了我国政府当时应急防控"应收尽收、应治

尽治"的政策要求。约束条件(11)表示 t 时刻的累 计隔离病床数量,等于初始时刻的隔离病床数量, 加上到 t 时刻累计新增的隔离病床数量,减去这一 段时间累计关闭的隔离病床数量。约束条件(12) 是 t 时刻所能入院接受治疗的感染人数约束。若 t 时刻剩余隔离病床数大于感染人数,那么所有的感 染者均可入院接受治疗;若t时刻剩余隔离病床数 小于等待入院的感染人数,那么剩余病床数即为所 能接受入院治疗的人数。约束条件(13)表示t时刻 分配的预算为新增或关闭隔离病床的费用、隔离病 床的运营成本与感染者的治疗费用之和。约束条 ((14) 表示t+1 时刻的可用预算为t 时刻的可用预 算加上 t 时刻的社会捐款减去 t 时刻分配的预算。 约束条件(15)表示各时刻分配的预算之和不能超 过国家应急财政拨款与累计社会捐款之和。约束 条件(16)为变量的非负约束。约束条件(17)为变 量的整数约束。

由于约束条件(9)和(12)的存在,本文所构建 的模型为混合整数非线性规划模型(MINLP),属于 典型的 NP 难题^[29]。由于模型约束条件的非线性 和非凸性,很难在短时间内获得其精确的最优解。 根据科学决策的满意准则,突发疫情的应急响应更 加追求在可行的短时间内获得问题的次优解或局 部最优解,而非刻意求全局最优解。基于此,本文 采用遗传算法对问题进行求解,从而保证获得结果 的时效性。

2 算例测试

2.1 参数设置

(1) 传染病模型相关参数设置

查阅《中国统计年鉴》^[30],2019 年武汉市常住 人口数为906.4万人。尽管春运期间有大量人口迁 移,但封城期间仍然有900多万人留在当地。因此, 本研究将906.4万人作为研究期内当地人口总数。 结合武汉市卫生健康委员会^[31]公布的定点医院病 床数据,设置研究初期隔离病床数为881。此外,结 合相关文献及疫情实际数据,对传染病模型中其他 参数进行设置,具体如表3所示。

表 3 传染病动力学模型相关参数设置 Cable 3 Parameter actings of anidomia dynamics model

Table 3 Parameter settings of epidemic dynamics model					
参数	意义	取值	参考文献		
N	疫情暴发区域的人口总数	9064000	《中国统计年鉴》[30]		
C_{0}	定点医院的初始病床数	881	武汉市卫生健康委员会[31]		
eta	感染者的传播率	0.1608	汪越等[32]		
δ	暴露者转化为感染者的概率	1/7	Li 等 ^[33]		
μ	感染者未住院接受治疗而死亡的比例	0.0070	桑茂盛等[34]		
arphi	感染者住院接受治疗后康复的比例	1/17	Li 等 ^[33]		
heta	感染者住院接受治疗但仍然死亡的比例	0.0010	桑茂盛等[34]		

(2)应急预算相关参数设置

对于突发疫情患者的治疗,我国采取的政策 是:在基本医保、大病保险、医疗救助等按规定支 付后,个人负担部分由财政给予补助。参考相关 新闻报道,模型中所涉及的各类成本参数设置如 表4所示。

表 4 应急预算相关参数设置

Tabl	e 4 Parameter settings of emerge	ncy budget
参数	意义	取值
η	新增隔离病床的固定成本	14000
ζ	关闭隔离病床的固定成本	3500
ω	隔离病床单位运营成本	2000
λ	患者住院治疗的单位治疗成本	1550/人/天
Ω	政府分配的财政预算	30亿

2.2 结果分析

通过模型测试,我们得到考虑社会捐款情况 下,累计感染人数及隔离病床变化情况见图3,其中 - 246 -- https://www.academax.com/dc 应急预算分配总额为43.3194亿元。从图3可以看 出,在2020年2月4日之前,本模型求解的累计感 染人数比实际累计感染人数略高,而在此之后比实 际累计感染人数略低,但总体相差不大。为验证模 型的有效性,我们对模型预测结果与实际感染人数 进行统计检验,结果如表5所示。由于统计检验的 p值大于0.05,说明本模型预测的疫情演化数据与 实际的疫情演化数据从统计学角度而言并无显著 差异。因此,本文所构建的模型能够有效刻画该地 区疫情扩散演化行为。此外,从图3还可以看出,在 初始阶段,随着疫情的扩散,感染者人数逐渐增加, 隔离病床需求也不断增加;到2月底左右,累计感染 人数变化基本保持稳定,随后隔离病床需求开始下 降,说明政府的决策是科学合理的。

在应急预算的具体分配方面:主要包括确诊患者住院治疗费用 12.2147 亿元(占比 28.20%),隔 离病床的运营费用 31.1466 亿元(占比 71.90%), 13587/1 cpki lijeem 2024 01 018



图 3 累计感染人数及隔离病床数结果分析 Figure 3 Analysis of cumulative number of infected individuals and isolated beds

表 5 每日新增感染人数实际值与预测值配对 t 检验结果 Table 5 Paired t-test results between model predicted daily number of new infected individuals and actual outbreak data

	均值		双尾配对 t 检验	
	实际值	预测值	<i>t</i> 值	配对 t 检验−p 值
新增感染人数	660. 2267	657. 1733	-0.046	0.964

这其中隔离病床的变动成本(运营成本)为25.6917 亿元(占比59.31%),固定成本(新增和关闭成本) 为5.6968亿元(占比12.59%)。为进一步展示社 会捐赠在疫情防控中的重要作用,给定政府应急预 算投入为30亿元不变,在此基础上,取不同比例的 社会捐款进行测试:0%(即无社会捐款)、10% (1.6877 亿)、20%(3.3754 亿)、30%(5.0631 亿)、 40%(6.7508 亿)、50%(8.4385 亿)、60%(10.1262 亿)、70%(11.8139 亿)、80%(13.5016 亿)、90% (15.1893 亿)、100%(16.8770 亿)。分析不同捐款 额度下的累计感染人数及应急预算分配变化情况, 具体结果如图 4 所示。



图 4 不同社会捐款投入对应的累计感染人数及应急预算分配比例 Figure 4 Cumulative number of infected individuals and proportion of emergency budget allocation corresponding to different social donation investments

对于政府管理者而言,合理的应急预算是多 少,本身就是一个重要的决策问题。如果预算太 少,难以控制疫情的发展;而如果过多,又造成资源 的浪费。结合图4,可以得出以下重要结论:

(1)在无社会捐款情况下,累计感染人数为 546238;而当社会捐款投入增加10%时,累计感染 人数下降18.29%;当社会捐款投入增加20%时,累 计感染人数下降32.24%;当社会捐款投入增加到 70%时,累计感染人数下降 89.41%。随着社会捐款 投入的增加,累计感染人数得到了快速有效的控制。但当社会捐款超过 70%时,累计感染人数已经下 降到较低水平。此时发现,当社会捐款投入继续增至 100%时,累计感染人数也没有明显下降。这表明了 总应急预算投入存在阈值现象,即当应急预算总额超 过一定的阈值时,增加的投入并不能带来相应的感染 人数的再次下降,本文称这一现象为应急预算投入的 "边际效用递减法则"。这也反过来说明疫情防控不 能仅仅依靠应急预算的增加,还需要通过很多其他非 医疗干预手段来帮助控制疫情,包括加强宣传、保持 社交距离、戴口罩、勤洗手、勤消毒等。

(2)通过对比应急预算分配的变化,可以发现 在总应急预算不足的情况下,治疗费用与隔离病床 费用分配比例约为 0.48:0.52;而随着总应急预算 的增加,这一比例逐步稳定到 0.28:0.72。这一结 论可以为政府突发疫情应急资源分配决策提供有 效的理论支撑,随着应急预算的不断增加,隔离病 床成本占比在逐渐增加。这其实也体现了我国政 府"以人为本"的救治理念,通过迅速改建隔离病床 及时控制感染者,避免进一步传染,从而保证患者 的"应收尽收、应治尽治",使得感染人数不断下降。

2.3 敏感性分析

2.3.1 干预起始时间影响分析

从控制的视角而言,对于任何突发公共卫生事件,越早进行应急干预效果越好,累计被感染的人数也会越少。但在管理实践中,每延迟一个单位时间,到底会造成多严重的后果尚不清楚,如果对其有一个定量的刻画,则可以有效辅助管理者进行更加科学合理的决策安排。为此,本文假设政府干预开始时间分别为2020年1月24日、1月31日、2月7日、2月14日,即测试每推迟一周,观测所对应的累计感染人数及应急预算分配变化情况,结果如图5和图6所示。



图 5 不同干预开始日期对应的累计感染人数

Figure 5 Cumulative number of infected individuals corresponding to different intervention start dates



Figure 6 Budget allocation corresponding to different intervention start dates

分析发现,应急起始干预日期每推迟一周,累 计感染人数成倍增加,所需投入的应急预算同样呈 现翻倍增长。如果从1月24日开始采取干预措施, 需要 43.3194 亿元的应急预算以应对 572 的初始感 染人数,此时最终的累计感染人数为49783,与当地 的实际情况较为吻合;而如果起始干预时间推迟到 2月14日时,初始感染人数已达68879,即使提供充 足的应急预算,累计感染人数也超40万。这一结果 还是比较理想的状态。在现实生活中,由于人群心 理的恐慌等作用,可能所需的应急投入要远大于 此。上述结果表明,在突发疫情应急管理中,不仅 应急预算投入存在阈值效应,起始干预时间也是一 个非常关键的因素,这一结果也再次充分验证了我 国政府在1月24日及时果断采取封城措施的正 确性。

2.3.2 隔离病床成本影响分析

由于我国的举国应急管理体制,政府部门为了 人民群众的生命健康安全,往往不计成本,因此面 对各类突发公共卫生事件,人民群众的获得感非常 明显,这也是我们国家社会制度的优越性所在。然 而,在非洲一些贫困区域甚至某些西方国家,由于 社会制度的差异,其突发疫情应急救援却饱受资金 不足的限制。居安思危,本文进一步测试由于医疗 资源挤兑导致各类应急设施及服务成本迅速上升 情境下,有限的应急预算应该如何优化分配的问 题。假定应急预算投入总额为43.3194亿元不变, 在隔离病床新增固定成本14000元、关闭固定成本 3500元、单位运营成本 2000元的基础上,分别测试 上述成本增加10%、20%、30%、40%、50%等不同比 例情景下的应急预算优化分配问题,具体结果如表 6 所示。

表 6 不同成本增长比例下的累计感染人数及最优费用分配 Table 6 Cumulative number of infected individuals and optimal cost allocation under different cost growth ratios

相关费 用增长 幅度	累计感染 人数	治疗费用	病床费用	病床费 用占比
0	49783	1.22E+09	3.11E+09	0.7190
10%	53941	1.31E+09	3.02E+09	0.6972
20%	67393	1.58E+09	2.75E+09	0.6358
30%	93520	1.62E+09	2.72E+09	0.6272
40%	162467	1.67E+09	2.66E+09	0.6134
50%	232568	1.69E+09	2.64E+09	0. 6093

显然,随着隔离病床各项成本的上升,原有的 应急预算额度出现不足,可以住院接受治疗的患者 人数减少,因此部分患者需要在院外等待更长的时 间,也就有了更多将病毒传播给其他人的机会,从

而导致累计感染人数迅速上升。如表6所示,当各 项成本上升 30% 时,累计感染人数增加 87.86% (43737人);而当各项成本增加50%时,累计感染人 数增加 367.16%(182785 人)。与此同时,从表 6 也 可以看到,随着相关费用的增加,即意味着应急预 算不足加剧。此时用于患者治疗的费用占比在逐 步增加,而用于建设隔离病床的费用占比在逐步减 少。此时政府要在患者救治与建设隔离病床之间 进行权衡,从而最合理地分配应急资源。由此可 见,在突发疫情应急响应中,控制医疗资源挤兑行 为、平稳医疗服务价格,对控制疫情的发展同样有 着非常重要的作用。

3 结论

本文以突发公共卫生事件为研究对象,首先结 合疫情传播特征构建 SEIHRD 系统动力学模型用于 刻画其扩散演化规律,然后通过对社会公众向红十 字会捐款数据的拟合,构建突发疫情环境下的社会 捐款函数;在此基础上,以未能入院接受治疗的感 染人数最少为目标,综合考虑政府固定预算与社会 捐款,构建总额可变环境下的应急预算分配混合整 数非线性规划模型。通过算例测试分析,获得如下 重要研究发现:(1)社会捐款在疫情应急响应中发 挥着重要的作用,而总应急预算投入则存在边际效 用递减效应,超过一定的阈值后,过多的预算投入 并不能起到明显的作用;(2)随着总应急预算投入 的增加,应急资金的分配比例逐渐趋于稳定;(3)起 始干预时间非常重要,每推迟一周,所需要增加的 应急投入成倍增长;(4)在突发疫情应急响应中,控 制医疗资源挤兑行为、平稳医疗服务价格,对控制 疫情的发展同样有着非常重要的作用。此外,本文 通过可接受入院治疗患者这一中间变量,实现了疫 情扩散演化模型与应急预算分配模型之间的有效 关联,这一创新决策框架设计无论从理论上还是现 实操作上,都具有重要的指导意义,也可为其他疫 情(如流感、SARS、Ebola等)应急救援提供一个基 础性的应急决策框架。

在研究局限方面,本文仅考虑了社会捐款,实 际上社会捐物也是很重要的一个方面,且由于突发 疫情初期供需信息的不对称,导致大量的社会捐赠 物资闲置,因此亟须利用决策分析技术构建供需双 边匹配的多目标优化模型,以帮助实现基于互联网 平台的应急物资供需信息识别与自动匹配。与此 同时,由于接收捐赠的慈善机构属于公益组织,无 法承担应急物资统一协调配送的巨大工作量。因 此,如何基于契约理论与第三方物流服务商构建政 企联合的应急物流协作配送策略,也就成为亟待解 https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.018

决的重要现实问题。这些研究问题的突破,都是疫情应急管理未来值得深入探索的研究方向。

参考文献

- [1] Johns Hopkins University Medicine. COVID-19 dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU) [EB/OL]. (2022-01-07) [2022-03-27]. https://coronavirus. jhu. edu/ map. html.
- [2] United Nations Conference on Trade and Development. COVID-19's economic fallout will long outlive the health crisis, report warns [EB/OL]. (2020-11-19) [2022-03-27]. https://unctad.org/news/covid-19s-economic-falloutwill-long-outlive-health-crisis-report-warns.
- [3] 央广网.对红十字会存在的问题,武汉官方作出一项 决定[EB/OL].(2020-02-01)[2022-03-27].https:// baijiahao.baidu.com/s?id=1657267804218337186&wfr = spider&for=pc.

CNR NEWS. Regarding the problems of the Red Cross Society of China Wuhan Branch, the authorities in Wuhan made a decision [EB/OL]. (2020-02-01) [2022-03-27]. https://baijiahao.baidu.com/s?id = 16572678042183 37186&wfr=spider&for=pc.

- [4] TURKYILMAZOGLU M. Explicit formulae for the peak time of an epidemic from the SIR model[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2021, 422:132902.
- [5] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China; a modelling study[J]. The Lancet, 2020, 395(10225):689-697.
- [6] BEDI P, DHIMAN S, GOLE P, et al. Prediction of COVID-19 trend in India and its four worst-affected states using modified SEIRD and LSTM models [J]. SN Computer Science, 2021, 2(3):224.
- [7] DE LA SEN M, IBEAS A. On an SE (Is) (Ih) AR epidemic model with combined vaccination and antiviral controls for COVID-19 pandemic [J]. Advances in Difference Equations, 2021, 2021(1):92.
- [8] HAO X J, CHENG S S, WU D G, et al. Reconstruction of the full transmission dynamics of COVID-19 in Wuhan [J]. Nature, 2020, 584(7821): 420-424.
- [9] 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. SHENG H X, WU L, XIAO C L. Modeling analysis and prediction on NCP epidemic transmission[J]. Journal of System Simulation,2020,32(5):759-766.
- [10] YANG Z F, ZENG Z Q, WANG K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions [J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, 12(3):165-174.

- [11] CHANG S, PIERSON E, KOH P W, et al. Mobility network models of COVID-19 explain inequities and inform reopening[J]. Nature, 2021, 589(7840):82-87.
- [12] 高太光,黄敏,陈培友. 物联网环境下煤矿救援资源调度多 Agent 自动协商模型[J]. 管理工程学报,2016,30
 (3):134-140.
 GAO T G, HUANG M, CHEN P Y. Multi-Agent automated

negotiation model of rescue resource allocation for coal mine accidents based on Internet of Things[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2016,30(3):134-140.

- [13] LIU Y, CUI N, ZHANG J H. Integrated temporary facility location and casualty allocation planning for post-disaster humanitarian medical service [J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review, 2019, 128:1-16.
- [14] 朱莉,曹杰,顾珺,等. 公平缓解灾民创伤下的应急物 资动态调配研究[J]. 系统工程理论与实践,2020,40 (9):2427-2437.
 ZHU L, CAO J, GU J, et al. Dynamic emergency supply

distribution considering fair mitigation of victim suffering
[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40
(9):2427-2437.

- [15] 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.
 ZHU L, CAO J. Emergency resource allocation optimization under disaster spreading with fuzzy demand
 [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences,2014,34(6):663-673.
- [16] EKICI A, KESKINOCAK P, SWANN J L. Modeling influenza pandemic and planning food distribution [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2014, 16(1):11-27.
- [17] LIU M, ZHANG D. A dynamic logistics model for medical resources allocation in an epidemic control with demand forecast updating[J]. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(6):841-852.
- [18] DASAKLIS T K, RACHANIOTIS N, PAPPIS C. Emergency supply chain management for controlling a smallpox outbreak: The case for regional mass vaccination
 [J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2017, 4(1):27-40.
- [19] LONG E F, NOHDURFT E, SPINLER S. Spatial resource allocation for emerging epidemics: A comparison of greedy, myopic, and dynamic policies [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2018, 20(2):181-198.
- [20] BÜYÜKTAHTAKIN İ E, DES-BORDES E, KIBIŞ. A new epidemics-logistics model: Insights into controlling the Ebola virus disease in West Africa [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(3): 1046-1063.

^{12(3):165-174. [21]} LIU M, XU X F, CAO J, et al. Integrated planning for https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.018

public health emergencies: A modified model for controlling H1N1 pandemic [J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(5): 748-761.

[22] 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 datadriven [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020,40(2):437-448.

[23] 王付宇,汤涛,李艳,等.疫情事件下多灾点应急资源 最优化配置研究[J].复杂系统与复杂性科学,2021, 18(1):53-62.

WANG F Y, TANG T, LI Y, et al. Study on optimal allocation of emergency resources in multiple disaster sites under epidemic events [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2021, 18(1):53-62.

- [24] 葛洪磊,刘南.重大传染病疫情演化情境下应急物资配置决策建模分析:以新冠肺炎疫情为例[J].管理工程学报,2020,34(3):214-222.
 GEHL, LIUN. Modeling of emergency materials allocation decision-making problems based on the evolution scenarios of serious infectious disease: A case of COVID-19[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2020,34(3):214-222.
- [25] COOK R A, LODREE E J. Dispatching policies for lastmile distribution with stochastic supply and demand [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 106:353-371.
- [26] 杜丽敬,夏翔,应焕软,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.

- [27] ANPARASAN A, LEJEUNE M. Resource deployment and donation allocation for epidemic outbreaks [J]. Annals of Operations Research, 2017, 283(1):9-32.
- [28] 武汉红十字会. 抗击新型肺炎武汉市红十字会接收社 会捐赠款物公告[EB/OL]. (2020-01-24)[2022-03-

27]. http://www.wuhanrc.org.cn/xxgs/jzgs/1.htm.

Red Cross Society of China Wuhan Branch. Publicity of Red Cross Society of China Wuhan Branch receiving social donation fund [EB/OL]. (2020-01-24) [2022-03-27]. http://www.wuhanrc.org.cn/xxgs/jzgs/1. htm.

 [29] 刘明明,崔春风,童小娇,等. 混合整数非线性规划的 算法软件及最新进展[J]. 中国科学:数学,2016,46 (1):1-20.

LIU M M, CUI C F, TONG X J, et al. Algorithms, softwares and recent developments of mixed integer nonlinear programming [J]. Scientia Sinica (Mathematica), 2016, 46(1):1-20.

- [30] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版 社,2020.
 NATIONAL BUREAU OF STATISTICS. China statistical yearbook[M]. Beijing; China Statistics Press, 2020.
- [31] 武汉市卫生健康委员会. 全市 23 家定点医院病床使 用情况[EB/OL].(2020-02-01)[2022-03-27]. http:// wjw. wuhan. gov. cn/ztzl_28/fk/tzgg/202004/t20200430_ 1197315. shtml.

Wuhan Municipal Health Commission. Utilization of beds in 23 designated hospitals in Wuhan [EB/OL]. (2020-02-01) [2022-03-27]. http://wjw. wuhan. gov. cn/ztzl_ 28/fk/tzgg/202004/t20200430_11 97315. shtml.

- [32] 汪越,刘明,曹杰.数据驱动的突发疫情传染扩散参数 动态更新策略[J].控制与决策,2023,38(2):555-561.
 WANG Y,LIU M,CAO J. A dynamic design strategy of epidemic spreading parameters based on data driven[J]. Control and Decision,2023,38(2):555-561.
- [33] LI Q, GUAN X H, WU P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. New England Journal of Medicine, 2020, 382(13):1199-1207.
- [34] 桑茂盛,丁一,包铭磊,等. 基于新冠病毒特征及防控 措施的传播动力学模型[J].系统工程理论与实践, 2021,41(1):124-133.
 SANG M S, DING Y, BAO M L, et al. Propagation dynamics model considering the characteristics of 2019nCoV and prevention-control measurements [J]. Systems

Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(1): 124-133.

Optimization of budget allocation for emergency epidemic controlling with considering social donations

ZHU Xiaoxiao¹, LIU Ming^{1*}, DU Yurui¹, 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)

economic development. As of 7 January 2022, the number of confirmed cases has reached 300,838,232, and the death toll has reached 5,485,853 due to the spread of the epidemic outbreak in the world. After the outbreak of the epidemic, the Communist Party of China and the state take actions immediately, and mobilize a lot of manpower, materials and financial resources for the emergency rescue. In addition, people around the world have also donated to the local Red Cross Society, of which the total amount reached 1.748 billion yuan. These social donations play an important role in prevention and control of this epidemic. However, due to the lack of scientific and effective emergency budget allocation method in the early stage of the outbreak, the distribution of social donations was uneven and chaotic, which led to strong dissatisfaction of the public. Therefore, after the sudden outbreak of a major epidemic, how to allocate emergency resource reasonably and scientifically is a key problem that needed to be solved urgently by the academic community. However, the emergency budget allocation of the government is usually of fixed amount in most existing literature, and it is scarce to consider the significance of social donations in the prevention and control of the speedy outbreak of a major epidemic.

In view of this, this paper constructed an optimization model for the allocation of variable emergency budget (fixed emergency budget and social donations) under the background of the epidemic outbreak. First, combined with the characteristics of the spread of the epidemic, the SEIHRD model is constructed to describe the evolution rules of its spread. And then, the social donation function is proposed by fitting the data of public donations to the Red Cross Society when facing the sudden outbreak of a major epidemic. On this basis, comprehensively considered the fixed budget of the government and social donations, the mixed integer nonlinear programming (MINLP) model for allocating emergency budget of variable total amount is constructed, with the objective of minimizing the total number of infected cases who are not hospitalized for treatment. Based on the characteristics of the model, a global optimization algorithm is designed in this paper to solve the problem. Moreover, sensitivity analysis experiments are performed to further study the impact of initiation time of intervention and the cost of hospital isolation beds on the epidemic development and emergency budget allocation.

Through the testing and analysis, the following notable findings are obtained in this paper: 1) Social donations play an important role in emergency response to an epidemic, while the diminishing marginal utility exists in the overall emergency budget investment. When the total emergency budget exceeds a threshold value, the increased investment will not bring about the corresponding decline in the number of infected individuals again. 2) With the increase of the total emergency budget, the allocation proportion of emergency funds gradually tends to be stable. 3) The intervention start date is of great significance. With each week of delay, additional emergency investment required multiplies. 4) In response to a major outbreak, controlling the similar behaviors of a run on banks in the field of medical resources and stabilizing the price of medical services also play a significant role in controlling the development of the epidemic.

In summary, this paper integrated social donations into the emergency budget allocation model under the environment of the speedy outbreak of a major epidemic, which is more in line with the actual situation of emergency rescue for major epidemic outbreaks in China. At the same time, this paper realized the dynamic coupling relation between epidemic transmission evolving model and emergency budget allocation model through the introduction of the state variables $\overline{I}(t)$. This innovative decision-making framework has important guiding significance both theoretically and practically, which also provide a basic decision-making reference for emergency prevention and control of other epidemic diseases (such as influenza, SARS, etc.).

Key words: Public health emergency; Social donation; Emergency management; Resource allocation; System optimization

Received Date: 2021-08-31

Funded Project: Supported by the Natural Science Foundation of China (71771120, 72171119) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX21_0394).

^{*} Corresponding author