

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2020.06.001

面向重大传染性疾病的应急资源管理研究综述

江志斌^{1,2}, 文 静³, 耿 娜², 周利平²

(上海交通大学 1. 安泰经济与管理学院; 2. 中美物流研究院; 3. 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 伴随传染病传播网络的发展变化, 应急资源需求具有时变性和随机性, 使得应急资源的管理研究具有一定挑战性, 有必要针对现有的面向传染性疾病的应急管理相关研究进行综述。首先介绍了传染病传播网络建模及分析方法, 然后针对传染病背景下的应急资源管理研究进行综述, 包括资源配置、选址和物流规划、库存和供应链管理以及资源重组4个主要研究领域, 最后对研究现状和未来研究重点进行归纳总结。

关键词: 传染病; 应急资源; 传播网络; 资源管理

中图分类号: R197.2; C935

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2020)06-0001-09

Emergency Resource Management in Response to Serious Infectious Diseases: A Literature Review

JIANG Zhibin^{1,2}, WEN Jing³, GENG Na², ZHOU Liping²

(1. Antai College of Economics and Management; 2. Sino-US Global Logistics Institute; 3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As the infectious disease network evolves, demands for emergency resource is time-varying and stochastic, implying that research for resource management is challenging. Hence, it is necessary to conduct literature review about the emergency resource management in response to infectious diseases. Firstly, model formulation and analysis on the epidemic network were introduced. Secondly, a survey of emergency resource management under epidemic was presented from four major research fields, i.e., resource allocation, location and logistic, inventory and supply chain management, and resource reorganization. Lastly, the existing researches were summarized and suggestions made for future research topics.

Key words: infectious diseases; emergency resource; epidemic network; resource management

传染性疾病的爆发不可预见, 其发展变化具有网络化阶段性的特点(显现期、暴发期、消退期等阶段)^[1]。在暴发前的准备期以及暴发后的各个阶段采取合理的应急资源管理措施, 能够有效平衡各区域各人群的疾控需求, 从而遏制疫情扩散。在传染性疾病的背景下, 其对应的应急资源管理问题与常规的资源管理问题不同, 主要表现为以下3点。

- 1) 疫情突发性导致相关资源需求存在突变, 常规的资源储备无法满足需求, 尤其是在疫情暴发期, 需求远远大于供给。
- 2) 应急资源需求的随机性不能由简单的分布函

数来表示, 该需求由传播网络和外界干预措施共同影响, 需通过复杂网络来刻画。

- 3) 伴随疾病传播网络的阶段性变化, 决策具有时效性, 常规的周期性的资源管理策略不再适用, 应采取阶段性的资源管理决策。

目前已有大量文献对地震、海啸、恐怖袭击等造成的大型伤亡事件进行应急资源配置与优化研究^[2-3]。这些文献主要针对伤员转移、伤员急救、避难所选址、灾后重建等问题进行研究, 侧重点在于以最小的成本和最短的时间将灾害影响降到最低(例如最大化伤员存活率等), 且大多是在已知伤亡

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 上海交通大学“新型冠状病毒防治专项”软课题资助项目(2020RK16); 中国博士后科学基金资助项目(2020T130406)

作者简介: 江志斌(1958-), 男, 安徽省人, 教授, 博士, 上海交通大学安泰经济与管理学院特聘教授, 中美物流研究院院长, 主要研究方向为智能制造及服务型制造运作管理、医疗健康服务管理、物流与供应链管理及工业工程管理创新方法。

状况下进行决策。针对传染性疾病的应急资源管理侧重点在于合理地调度资源从而尽快控制疫情的传播,且管理决策对传播网络的影响具有时滞性,这是一个伴随传染病疫情全生命周期的动态决策过程。因此,有必要针对重大传染病疫情中的应急医疗资源管理问题进行单独的研究和综述,为进一步开展相关研究和应对未来可能发生的重大疫情提供重要参考。

1 综述逻辑框架及文献研究方法

首先针对传染病传播网络研究进行综述,包括传播网络建模和分析方法2部分。然后针对应急资源管理方法进行综述,分析文献中关注的研究领域和常用的方法技术路线。本文所指医疗资源包

括医疗设备、防护设备、医护人员、疫苗、政府资金投入等。参考文献来源于ScienceDirect, Elsevier, 中国知网、万方等中英文数据库。本文逻辑框架见图1。

本文参考文献总共80篇,其中与本文主题密切相关的文献共有71篇。针对这些文献,统计其出版年和中英文文献占比,如图2和图3所示。统计数据表明,近10年的研究占比为60%,中文文献比例相对较低,为17%。

图4给出了研究领域分布和不同领域对应的文献数量。有的文献可能包含多个研究领域,比如在研究传播网络的基础上探讨资源配置策略,在研究物流规划问题的同时优化库存策略等,本文则按照文章的侧重点将其归为相应的研究领域。由图4可知,有关传播网络和资源配置的文献较多,而资源

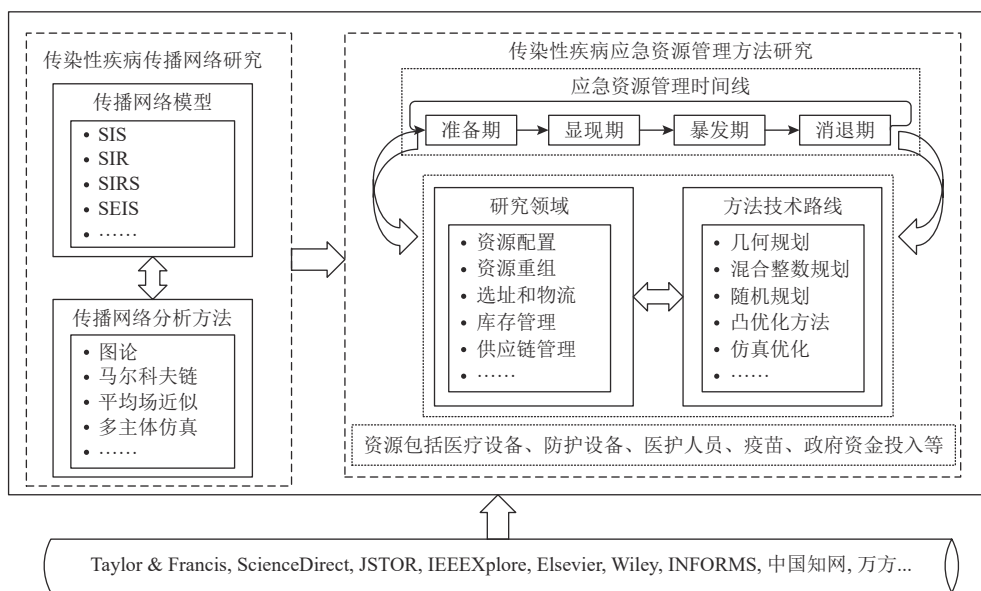


图 1 综述逻辑框架

Figure 1 Framework of literature review

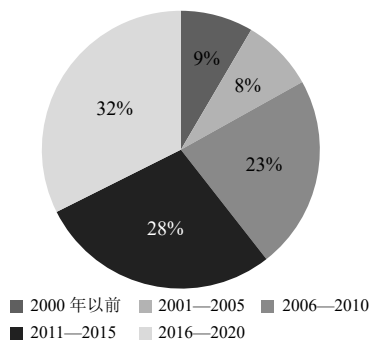


图 2 文献出版年统计

Figure 2 Statistical analysis on publication years

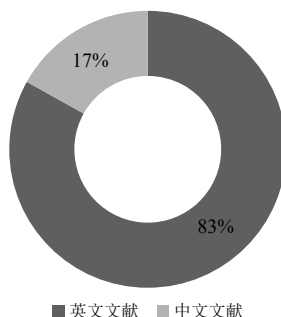


图 3 中英文文献占比统计

Figure 3 Statistical analysis on publication languages

重组、选址和物流规划、库存和供应链管理相关的文献较少。在其他研究背景下, 选址物流以及库存供应链相关文献资源较为丰富, 也具有一定的可借鉴性, 本文仅统计传染病背景下的相关文献。

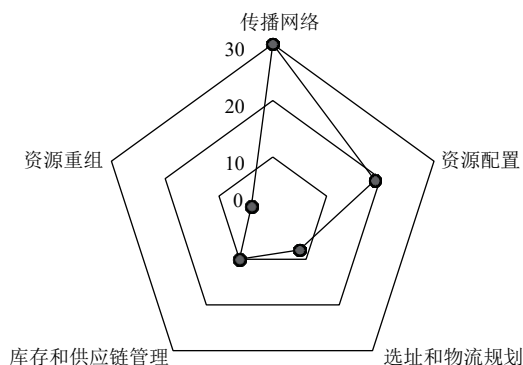


图4 研究领域分布统计

Figure 4 Statistical analysis on research fields

2 传染性疾病传播网络研究

2.1 传播网络模型

建立疫情传播网络模型有助于理解和认识传染病在群体中的扩散过程, 进而科学有效地采取干预措施遏制疫情蔓延。1906年, Hamer^[4]针对麻疹的反复流行, 构造离散时间的疾病传播模型。1927年, Kermack等^[5]提出仓室模型, 建立具有双线性发生率的易感-传染-治愈(susceptible-infected-recovered, SIR)传播模型, 开创了传染病传播研究的动力学方法。在仓室模型中, 个体被认为均匀混合, 并且相互之间充分接触, 每个个体被疾病感染的概率完全相同。有不少文献提出并研究了多种传播模型, 例如易感-传染(susceptible-infected, SI)、易感-传染-易感(susceptible-infected-susceptible, SIS)、易感-传染-治愈-易感(susceptible-infected-recovered-susceptible, SIRS)、易感-潜伏-传染(susceptible-exposed-infected, SEI)、疑似-警惕-感染-疑似(susceptible-alert-infected-susceptible, SAIS)^[6]、疑似-暴露-感染-警惕(susceptible-exposed-infected-vigilant, SEIV)^[7]、易感-潜伏-传染-治愈(susceptible-exposed-infected-recovered, SEIR)模型等^[8-11]。针对不同疾病种类和情境设定, 应采取合适的模型进行建模研究, 已有文献采用SEIR网络模型分析最近全球暴发的新冠肺炎疫情传播网络^[12-13]。

基于基础的仓室模型, 不少文献对多种群传染

病模型^[14]进行研究, 模型将一个国家或地区的全部人口根据地理、文化等特征划分为若干个子群体, 不同的子群体之间人口互相流动, 每一个子群体的内部按照仓室模型来描述其疾病传染规律。由于此类问题的建模形式复杂、求解规模较大, 大部分研究结果建立在特定条件的特殊模型之上^[15]。考虑到传播途径和传播机理的特殊性, 一些文献还对虫媒传播等媒介传染病系统进行建模研究^[16-17]。

2.2 传播网络分析方法

部分文献采用图论、离散时间马尔科夫过程和多主体仿真模型描述动态转移过程并对传播网络进行理论分析^[18-20]。随着传染病模型的发展, 越来越多的文献研究具有时滞性和非线性疾病发生率^[21-23]的传染病模型, 需进一步采用复杂网络分析工具对传播网络平衡点、稳态状态和基本再生数(R_0)等进行分析^[24-26]。基本再生数是传播网络分析中的一个重要指标, 反映疫情的传播能力, 对疾病的预防和控制、免疫策略等具有指导意义。具体而言, 基本再生数是指在发病初期, 当所有人均为易感者时, 一个患者在其平均患病期内所传染的人数^[27-28]。

复杂网络模型通常会用到统计物理学中的平均场理论来分析BA无标度网络的度分布情况^[29], 通过将平均场近似定理应用到马尔科夫动态转移过程中, 可以将原始的动态传播网络模型近似为一个微分方程组^[30]。针对不同的微分方程组, 可以采用不同的解析方法, 包括异质平均场、淬火平均场、有效度方法等。其中, 有效度方法是一个高阶的基于度的平均场理论, 包含了节点和邻近节点的动力学关联性^[31]。

3 应急资源管理研究内容分析

传染性疾病相关的应急资源管理涵盖多个研究领域, 下面将分别对资源配置、选址和物流规划、库存和供应链管理、资源重组这4个相关研究领域进行综述, 并简要介绍文献中常用的建模及优化方法。

3.1 资源配置

控制疫情传播的有效方法是增大治愈率, 减少感染率。增大治愈率, 需要提供更多的医疗资源; 减少感染率, 可以通过增加资金及人力资源投入从而限制人群接触率和人口流动速率等, 也可以通过派发防护物资、注射疫苗^[32]等实现。给定有限的资源, 如何识别影响疫情发展的关键节点, 然后区别

化地、统筹兼顾地对不同的资源需求点进行资源配置,从而使得疫情以最快的速度、最好的效果得到控制,是资源配置的关键问题^[33]。

Rachaniotis等^[34]考虑多个独立的组群,每个组群采用SIR模型描述。只考虑一个医疗小组的医疗资源,决策是如何确定医疗小组的服务顺序从而使得总感染人数最小,该问题类似单服务台的车间调度问题。Brandeau等^[35]考虑多个独立的互不影响的组群,每个组群对应不同的初始状态和一个简单的SI传播网络模型,采用价值函数(cost function)来表示资源配置决策对传播网络参数的影响。给定总的资金量,决策是确定每个组群应投入的资金数量,使得被感染的人数最少或质量调整生命年(quality-adjusted life years, QALYs)最长。Deng等^[36]通过对区域内人群接种疫苗和关闭公共活动场所来控制疫情,以最小化期望感染人数为目标,建立非线性整数规划模型,用于确定疫苗接种人群和应关闭的公共场所。该文为静态调度,即给定各类人群前往各个场所的概率以及人群的初始感染状态,求解规划模型并给出最优决策。Chen等^[37]针对包含 N 个节点的无向网络建立SIS流行疾病传播模型,决策为给每个节点配置的医疗资源数量,其中每个节点的治愈率与资源数量成正比。根据淬火平均场理论和异构平均场理论,研究网络平均度、节点治愈率和有效感染率的关系,理论分析证明,在低度节点配置更多的资源能够最小化病情扩散。Long等^[38]针对多区域的埃博拉疫情,考虑有限的医疗救治小组,建立两阶段模型,用于确定资源配置决策时间点以及资源配置数量,对比了4种不同的资源配置策略,结果表明短视策略效果最好。Rowthorn等^[39]考虑2个耦合的系统,每个系统通过SIS模型描述,在资源数量有限的情况下,以最小化总感染人数的折现值为目标,确定2个系统的资源配置策略。对最优控制策略进行了理论分析,结果表明应优先满足低风险系统的要求,资源有剩余的情况下再分配给其他系统。Liu等^[40]针对医疗资源供应商、配送中心和当地定点医院3个层级的资源配置问题进行研究,主要考虑从供应商到配送中心的成本以及从配送中心到当地定点医院的成本,在给定资源数量以及物资需求的约束下,以最小化总配置成本为目标,建立数学规划模型从而获得优化的资源配置方案。Wu等^[41]采用非线性规划模型评估流感疫苗在美国

10个区域中的配置问题。Enayati等^[42]在疫苗资源配置研究中,考虑了资源配置的公平性问题,采用基尼系数来表示疫苗资源在各类人群中分配的公平性。

3.2 选址和物流规划

目前已有大量文献针对紧急响应和人道主义援助相关的选址和物流规划问题进行了研究^[43-46]。Dasaklis等^[47]于2012年针对传染性疾病相关的物流规划问题进行了综述,本节则主要针对2012年之后的相关文献进行综述。Wilson等^[48]对比了抗病毒治疗中心分别设在城市和乡村的区别。王新平等^[49]基于SEIR传播模型对各疫区的时变应急物资需求进行预测,基于该预测建立了多目标混合整数随机规划模型,然后采用遗传算法优化应急物流配送策略。Liu等^[50]考虑4个层级的物流网络:国家战略存储、城市卫生署、区域疾病防控中心和紧急定点医院,对疫情恢复阶段的物资调配进行研究。由于恢复阶段的疫情扩散趋于稳定,采用静态模型进行建模,决策变量是层级间物资的转移数量,以总的物流成本最小化为目标进行优化求解。Büyüktaktakin等^[51]将传染病动态传播特征融入物流规划问题中,以最小化感染人数和死亡率为目标,建立混合整数非线性规划模型,并直接在CPLEX求解器中求解获得最优物流方案,最后采用2014—2015年埃博拉疫情数据验证该物流规划模型的有效性。Fusco等^[52]探讨隔离房选址、物流规划和能力配置方案对传染病疫情控制的重要作用,针对地中海地区的隔离房现状进行数据分析,并提出相应的管理建议。Zhao等^[53]针对感染性医疗废弃物回收中的物流问题进行研究。在已知医疗废弃物回收点、集中处置场以及专用收集车辆信息的基础上,考虑系统成本最小化和运输风险最小化2个目标,建立多目标数学规划模型,并进一步采用两阶段启发式算法对模型进行求解。Nolz等^[54]也针对感染性医疗废弃物的回收物流问题进行研究,建立两阶段数学规划模型:第1阶段决策回收时间点以及车辆途经各个药房的运输路线,第2阶段决策每一个药房对应的回收箱的数量;提出2种启发式算法求解原问题:第1种是将原问题近似为基于样本的混合整数规划模型并求解,第2种采用适应性的大规模邻域搜索算法求解。

3.3 库存和供应链管理

Saha等^[55]主要从医院常规运转需求的角度对医疗库存管理研究进行综述。目前针对传染性疾病的

库存和供应链管理研究较少, 以疫苗库存为例, 当传染病疫情暴发时, 所有易感人群均可通过注射疫苗的方式避免被传染, 库存控制的出发点则在于如何设置安全库存水平, 从而在短时间内满足突增的疫苗需求的同时避免较大的疫苗过期成本^[56]。

Liu^[57]探讨简单和复杂2种疫苗库存模型。在简单库存模型中, 考虑一个供应商和一个地区的需求, 以最小化疫苗短缺数量为目标, 在给定的库存成本和疫苗过期成本的约束条件下, 建立非线性规划模型。在复杂库存模型中, 考虑多个供应商和多个地区, 决策变量为每个地区的库存水平和每个供应商的生产速率, 约束包括资源约束、疫苗保质期约束和总成本约束, 基于Anderson^[58]的SEIR传染病传播模型, 确定描述人群数量变化的常微分方程, 以最小化总感染数为目标, 建立疫苗库存优化模型。该文以数学建模为主, 不考虑求解的问题。Vila-Parrish等^[59]综合考虑疫情扩散、患者健康状态和药物保质期等因素, 建立库存仿真模型。首先建立SIR疫情传播模型, 并采用离散时间仿真模型近似原始微分方程, 以最小化总成本为目标, 建立库存决策动态规划模型, 决策变量为每一个阶段的最优的药品预订及药品生产计划。综合考虑疫情传播模型和库存决策模型的问题规模较大, 解析求解存在困难, 作者进一步提出3种启发式的库存管理策略, 并基于Arena仿真模型测试3种策略的性能。Paul等^[60]研究包含非流感季和流感季的阶段性动态药物库存管理方法, 建立疑似-潜伏-感染-治疗-康复-疑似(susceptible-exposed-infected-treatment-recovered-susceptible, SEITRS)系统动力学传播模型, 将该模型离散化用于未来一段时期的需求预测, 提出了5种不同的库存管理策略, 用于确定当前阶段的订货量。最后采用仿真模型测试不同的预测模型和库存管理策略组合的性能, 数值实验结果表明, 复合预测模型和较短的库存决策周期能够更好地满足患者药物需求, 从而更好地控制疫情扩散。Brauer^[61]和Fusco等^[62]介绍了欧洲部分国家地区医院隔离房的服务能力, 并强调隔离房的库存控制在疫情控制中的重要作用。

Anparasan等^[63]强调了疫情暴发期间发展中国家供应链管理的重要性, 并整理了2010年海地霍乱疫情期间患者的时间序列数据, 为数据驱动的针对应急医疗资源的多阶段供应链模型的研究提供数据

支撑。Paul等^[64]将多层次供应链模型集成在SEITRS疾病传播模型中, 探讨药物供应链对疾病传播网络的影响。在该集成模型中, 通过分析疾病传播模型得到药物需求量并作为供应链模型的输入, 分析求解供应链模型得到药物分派和交付时间, 该时间进而影响感染患者在医院的治疗时间。基于Anylogic建立仿真模型并评估了集成模型的性能指标, 结果表明, 集成模型能够更准确地估计疾病的传播参数, 从而更有效地控制疫情蔓延。Paul等^[65]在上述基础上, 进一步研究疫情控制中的鲁棒供应链策略, 研究结果表明, 药物短缺以及短缺持续时间对疫情影响较大。

3.4 资源重组

考虑到传染病患者的隔离需求, 有必要对现有医疗资源进行资源重组研究。Sihn^[66]介绍了1894年香港鼠疫期间东华医院内部的资源重组方案, 主要包括扩建外部停尸房和推进收治病房的建设, 病房内包含一定数量的简易的木制病床。患者按诊断结果分配到收治病房, 形成初步的隔离。东华医院收治病房系统是医院引入西方传染病管理学的空间重组的象征。Meltzer等^[67]提出对埃博拉感染患者实行快速统一收治策略能够有效降低传染风险从而达到控制疫情扩散的目的。谢东晓等^[68]针对北京市石景山区“非典”防治工作的需要, 提出具体的医疗资源整合方案, 明确区SARS病人收治中心、疑似SARS病人收治医院、发热病人的观察治疗医院以及群众日常看病的洁净医院, 形成有利于提高收治率、控制传染源的医疗格局。我国应对新冠肺炎疫情的经验也进一步验证了资源重组的重要性, 设置重症收治医院, 组建轻症方舱医院以及将社区医院和酒店改设为临时隔离点等措施, 有效避免了传染病的大规模扩散。

3.5 建模及优化方法

部分文献针对传播模型的阶段时变性特征建立了多阶段决策模型。Zaric等^[69]采用生产函数描述决策对模型参数的影响, 且假设生产函数已知, 以多阶段的资源投放数量为决策变量, 建立数学规划模型并求解。尽管考虑了多阶段决策, 但是由于未来的需求变化均可通过传播模型求解得到, 因此, 采用一次性求解静态数学规划模型的方式获得多阶段决策, 其他一些文献也采用了类似的方法进行多阶段决策^[10, 70-71]。Liu等^[40]将动态决策问题划分成多

阶段的静态子问题,每到决策点时,更新SEIR模型并预测下一阶段每个疫区的物资需求,然后建立整数规划模型,最后采用启发式算法求解获得资源配置方案。虽然涉及多阶段动态决策,但实质是把动态问题划分为多个静态问题来求解,其他一些文献也采用了滚动式的静态规划模型进行多阶段动态决策^[72-74]。

前述大量文献采用混合整数规划或几何规划模型^[75-77]对传染性疾病相关的应急资源管理问题进行建模,几何规划是一种非线性非凸优化问题,可以通过转化为凸优化问题并直接采用内点法求解从而获得全局最优解^[78]。对于简单的数学规划模型可直接采用商业求解器求解,而对于目标函数非线性以及变量数较大的模型,直接求解存在困难,一般采用启发式算法求解。也有文献采用博弈的方法来研究2个国家的应急资源配置问题^[79]。

4 研究现状总结及未来研究重点

4.1 研究现状总结

现有文献基于传染性疾病传播特征,利用复杂网络和运筹优化理论方法,对传染性疾病传播网络和应急资源管理决策进行了研究,下面分别针对这2部分研究现状进行总结。

1) 传染性疾病传播网络研究从简单的仓室模型到复杂网络,逐渐将时滞性、非线性疾病发生率等因素考虑进来,使得模型更加贴合实际,同时也使得解析求解更加困难。现有文献一般采用状态微分方程描述复杂网络动力学模型,并基于复杂网络分析工具、多主体仿真平台以及平均场理论等实现网络模型的建模与分析,其中平均场理论能够实现针对复杂网络的解析分析,是传播网络理论研究的重要工具。传染性疾病传播网络研究能够为疫情预测、应急资源管理、卫生防疫相关决策提供可靠的支撑。

2) 现有文献针对应急资源管理的研究主要涉及资源配置、选址和物流规划、库存和供应链管理,以及资源重组4个研究领域。资源配置决策一般从横向多区域以及纵向多层级的角度出发,探讨资源数量有限的情况下,如何配置资源使得感染人数最少或者配置成本最小。选址和物流规划相关文献将传染病传播特征融入传统的模型中,以最小化物流成本或总感染人数为目标确定决策方案,其中针对

感染性医疗废弃物回收的物流规划具有特殊性,值得更进一步的研究。库存和供应链管理相关文献通常基于传染病传播模型预测需求,继而根据需求提出针对疫苗及药物的管理方案。资源重组相关文献较少,大多采用定性分析的方法提出相应的管理措施。就技术路线而言,混合整数规划和几何规划常用于资源管理优化决策的建模和分析,由于问题复杂程度各异,可采用精确求解、近似求解或启发式算法求解的方法获得优化决策方案。针对供应链管理和资源重组问题,量化建模及分析的研究较少,主要原因在于这2类问题本身比较复杂,而传播网络的复杂性进一步叠加,使得数学建模和解析求解存在挑战。

4.2 未来研究重点

目前国内外针对传染病期间的资源管理研究涉及面广,有全面的理论基础和模型支撑,然而大部分研究依然没有突出传染病流行期间的供需特点,尤其在探讨资源配置、选址问题、物流规划和库存管理问题时,通常采用传统的供需模型进行数学建模,没有考虑传染病期间患者的隔离需求、非感染病患的诊疗需求、供应链供给能力不足等问题。因此,在未来的研究中,应围绕传染病期间供需双方的特点,重点研究以下几方面内容。

1) 综合考虑感染患者隔离需求和其他病患者诊疗需求的资源管理方案。

世界卫生组织于2014年出版医院预防传染病相关规范^[80]。该规范提出在传染病暴发期间平衡普通患者和感染患者2类需求的必要性,同时建议可以通过医院间、区域内的合作兼顾2类患者的诊疗需求。我国在应对SARS和新冠肺炎疫情期间,大多数医院通过关闭普通门诊和急诊的方式,避免医院内部的交叉感染,使得疫情期间非感染病患者无法得到及时诊疗。基于此,亟需研究合理科学的资源重组方案,在避免交叉感染的同时最大化非感染病患者的就诊权益。

2) 供应链层面的应急资源管理。

疫情传播期间往往会影响整个产业链的复工复产,相应的医疗物资供给缺口较大。基于此,应建模分析多级供应链和疫情传播网络的关系,瞄准供应链中的关键环节,在避免感染风险的前提下,有预见性地精准地拉动供应链生产、配送和交付。综合考虑供应链和传播网络的模型较为复杂,可以结合数据挖掘、机器学习等方法分析参数间的耦合关

系。此外, 面对天灾或人祸, 如何识别、分析和应对供应链风险, 从而保障供应链安全, 是全球经济一体化背景下面临的重要科学问题。

3) 针对传染性疾病期间的资源管理评价体系研究。

目前大多数文献均以最小化成本、最小化总感染人数或最大化质量调整生命年为目标, 评价标准过于简单, 缺乏社会政治伦理等多方面因素的考量。例如在多个地区疫情不平衡、资源不平衡的情况下, 以全局最小化感染人数为目标的同时, 也应考虑各区域的资源配置公平性问题, 从而减少疫情恐慌。类似的公平性问题也适用于不同人群的资源配置问题上, 例如在呼吸机资源紧缺的情况下, 老年人和青年人之间、慢性疾病患者和无慢性病史患者之间的公平性决策。除了上述结果评价指标, 还应包括过程评价指标, 例如感染率、治愈率和基础再生数等。有必要结合传染性疾病的特点, 建立一个全面立体的资源管理评价体系。

参考文献:

- [1] 许骏. 基于复杂网络的传染病突发事件应急管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
XU Jun. Research of emergency management for infectious disease based on complex networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2003.
- [2] TIMBIE J W, RINGEL J S, FOX D S, et al. Systematic review of strategies to manage and allocate scarce resources during mass casualty events[J]. *Annals of Emergency Medicine*, 2013, 61(6): 677-689.
- [3] CAUNHYE A M, NIE X, POKHAREL S. Optimization models in emergency logistics: a literature review[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(1): 4-13.
- [4] HAMER W H. Epidemic disease in England—the evidence of variability and of persistency of type[J]. *Lancet*, 1906, 167(4305): 569-574.
- [5] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1927, 115(772): 700-721.
- [6] SAHNEH F D, CHOWDHURY F N, SCOGGIO C M. On the existence of a threshold for preventive behavioral responses to suppress epidemic spreading[J/OL]. (2012-09-05). *Scientific Reports*, 2012, <http://10.1038/srep00632>.
- [7] NOWZARI C, PRECIADO V M, PAPPAS G J. Optimal resource allocation for control of networked epidemic models[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(2): 159-169.
- [8] BRAUER F, DRIESSCHE P. Models for transmission of disease with immigration of infectives[J]. *Mathematical Biosciences*, 2001, 171(2): 143-154.
- [9] CAPALDI A, BEHREND S, BERMAN B, et al. Parameter estimation and uncertainty quantification for an epidemic model[J]. *Mathematical Biosciences & Engineering*, 2012, 9(3): 553-576.
- [10] BRANDEAU M L. Allocating resources to control infectious diseases[M]// BRANDEAU M L, SAINFORT F, PIERSKALLA W P. *Operations research and health care: a handbook of methods and applications*. Boston: Springer, 2005, 70: 443-464.
- [11] ALLEN L J S. Some discrete-time SI, SIR, and SIS epidemic models[J]. *Mathematical Biosciences*, 1994, 124(1): 83-105.
- [12] 耿辉, 徐安定, 王晓艳, 等. 基于SEIR模型分析相关干预措施在新型冠状病毒肺炎疫情中的作用[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2020, 41(2): 175-180.
GENG hui, XU Anding, WANG Xiaoyan, et al. Analysis of the role of current prevention and control measures in the epidemic of Corona virus disease 2019 based on SEIR model[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2020, 41(2): 175-180.
- [13] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于SEIR的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(3): 369-374.
FAN Ruguo, WANG Yibo, LUO Ming, et al. SEIR-based COVID-19 transmission model and inflection point prediction analysis[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020, 49(3): 369-374.
- [14] GUO H, LI M Y, SHUAI Z. A graph-theoretic approach to the method of global Lyapunov functions[J]. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 2008, 136(8): 2793-2802.
- [15] 何雨璇. 突发公共卫生事件中的人道主义医药物资分配[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
HE Yuxuan. Humanitarian medical relief allocation in public health emergency[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] ZHEN J, MA Z, HAN M. Global stability of an SIRS epidemic model with delays[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2006, 26(2): 291-306.
- [17] 郭树敏. 传染性疾病传播机制与控制的系统研究[D]. 北京: 中国航天第二研究院, 2010.
GUO Shumin. System research on transmission mechanism and control of some infectious diseases[D]. Beijing: The Second Academy of China Aerospace, 2010.
- [18] ZHANG M, MENG R, ALEXANDER V. Including public transportation into a large-scale agent-based model for epidemic prediction and control[C]. *Proceedings of the Conference on Summer Computer Simulation*. San Diego, CA: Society for Computer Simulation International, 2015.
- [19] LEFEVRE C. Optimal control of a birth and death epidemic process[J]. *Operations Research*, 1981, 29(5): 971-982.
- [20] GÓMEZ S, ARENAS A, BORGE-HOLTHOEFER J, et al. Discrete-time Markov chain approach to contact-based disease spreading in complex networks[J]. *Europhysics Letters*, 2010, 89(3): 38009_1-38009_6.
- [21] SUN R. Global stability of the endemic equilibrium of multi-group SIR models with nonlinear incidence[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2010, 60(8): 2286-2291.
- [22] XIAO D, RUAN S. Global analysis of an epidemic model with nonmonotone incidence rate[J]. *Mathematical Biosciences*, 2007,

- 208(2): 419-429.
- [23] YUAN Z, WANG L. Global stability of epidemiological models with group mixing and nonlinear incidence rates[J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2010, 11(2): 995-1004.
- [24] 魏泽萍. 具有非线性疾病发生率的传染病模型动力学分析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- WEI Zeping. Dynamic analysis of the infectious disease models with nonlinear incidence rate[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [25] BORKAR V S, SUNDARESAN R. Asymptotics of the invariant measure in mean field models with jumps[J]. *Stochastic Systems*, 2012, 2(2): 322-380.
- [26] YANG Z, ZHOU T. Epidemic spreading in weighted networks: an edge-based mean-field solution[J]. *Physical Review E*, 2011, 85(5): 056106_1-056106_6.
- [27] 崔玉美, 陈姗姗, 傅新楚. 几类传染病模型中基本再生数的计算[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2017, 14(4): 14-31.
- CUI Yumei, CHEN Shanshan, FU Xinchu. The thresholds of some epidemic models[J]. *Complex System and Complexity Science*, 2017, 14(4): 14-31.
- [28] 王毅. 复杂网络上疾病传播的建模及其动力学[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WANG Yi. Modeling and dynamics of disease spreading on complex networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [29] 董苏雅拉图. 基于平均场理论的信息传播模型研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- DONG Suyalatu. Studies on information propagation model based on mean field theory[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [30] VAN MIEGHEM P, OMIC J, KOOIJ R. Virus spread in networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(1): 1-14.
- [31] 蔡超然. 复杂网络上传染病传播动力学及接种动力学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- CAI Chaoran. Epidemic spreading dynamics and vaccination dynamics on networks[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [32] WU J T, WEIN L M, PERELSON A S. Optimization of influenza vaccine selection[J]. *Operations Research*, 2005, 53(3): 456-476.
- [33] NOWZARI C, PRECIADO V M, PAPPAS G J. Analysis and control of epidemics: a survey of spreading processes on complex networks[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2016, 36(1): 26-46.
- [34] RACHANIOTIS N P, DASAKLIS T K, PAPPIS C P. A deterministic resource scheduling model in epidemic control: a case study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 216(1): 225-231.
- [35] BRANDEAU M L, ZARIC G S, RICHTER A. Resource allocation for control of infectious diseases in multiple independent populations: beyond cost-effectiveness analysis[J]. *Journal of Health Economics*, 2003, 22(4): 575-598.
- [36] DENG Y, SHEN S, VOROBAYCHIK Y. Optimization methods for decision making in disease prevention and epidemic control[J]. *Mathematical Biosciences*, 2013, 246(1): 213-227.
- [37] CHEN H, LI G, ZHANG H, et al. Optimal allocation of resources for suppressing epidemic spreading on networks[J]. *Physical Review E*, 2017, 96(1): 012321_1-012321_7.
- [38] 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.
- [39] ROWTHORN R E, LAXMINARAYAN R, GILLIGAN C A. Optimal control of epidemics in metapopulations[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, 6(41): 1135-1144.
- [40] LIU M, ZHANG Z, ZHANG D. A dynamic allocation model for medical resources in the control of influenza diffusion[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2015, 24(3): 276-292.
- [41] WU J T, RILEY S, LEUNG G M. Spatial considerations for the allocation of pre-pandemic influenza vaccination in the United States[J]. *Proceedings Biological Science*, 2007, 22(274): 2811-2817.
- [42] ENAYATI S, ÖZALTIN O Y. Optimal influenza vaccine distribution with equity[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 283(2): 714-725.
- [43] WANG B, HE S. Robust optimization model and algorithm for logistics center location and allocation under uncertain environment[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2009, 9(2): 69-74.
- [44] RAHMAN S, SMITH D K. Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 123(3): 437-452.
- [45] METE H O, ZABINSKY Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 126(1): 76-84.
- [46] 繆成, 许维胜, 吴启迪. 大规模应急救援物资运输模型的构建与求解[J]. *系统工程*, 2006, 24(11): 6-12.
- MIU Cheng, XU Weisheng, WU Qidi. A transportation modal and solution of large-scale emergency relief commodities[J]. *System Engineering*, 2006, 24(11): 6-12.
- [47] DASAKLIS T K, PAPPIS C P, RACHANIOTIS N P. Epidemics control and logistics operations: a review[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 139(2): 393-410.
- [48] WILSON D P, KAHN J, BLOWER S M. Predicting the epidemiological impact of antiretroviral allocation strategies in KwaZulu-Natal: the effect of the urban-rural divide[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(38): 14228-14233.
- [49] 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(2): 283-291.
- WANG Xinping, WANG Haiyan. Optimal multi-period collaborative scheduling of emergency materials for multiple epidemic areas[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2012, 32(2): 283-291.
- [50] LIU M, ZHANG P. Three-level and dynamic optimization mo-

- del for allocating medical resources based on epidemic diffusion model: LISS 2012[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 241-246.
- [51] BÜYÜKTAHTAKIN İ E, DES-BORDES E, KIBİŞ E Y. 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.
 - [52] FUSCO F M, BROUQUI P, IPPOLITO G, et al. Highly infectious diseases in the Mediterranean Sea area: inventory of isolation capabilities and recommendations for appropriate isolation[J]. *New Microbes and New Infections*, 2018, 26: S65-S73.
 - [53] ZHAO J, MA Z. Fuzzy multi-objective location-routing-inventory problem in recycling infectious medical waste[C]. *International Conference on E-business and E-government*. Guangzhou: ICEE, 2010.
 - [54] NOLZ P C, ABSI N, FEILLET D. A stochastic inventory routing problem for infectious medical waste collection[J]. *Networks*, 2014, 63(1): 82-95.
 - [55] SAHA E, RAY P K. Modelling and analysis of inventory management systems in healthcare: a review and reflections[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 137: 106051_1-106051_16.
 - [56] CONN R, WELCH F J, POPOVICH M L. Management of vaccine inventories as a critical health resource[J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2008, 27(6): 61-65.
 - [57] LIU Y. Mathematical models of vaccine inventory design for a breakout of epidemic disease[J]. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, 7(1): 2150013-2150014.
 - [58] ANDERSON R M. The population dynamics of infectious diseases: theory and applications[M]. Boston: Springer, 1982.
 - [59] VILA-PARRISH A R, IVY J S, HE B. Impact of the influenza season on a hospital from a pharmaceutical inventory management perspective[M]//MUSTAFAEE N. *Operational research for emergency planning in healthcare: volume 1*. London: Palgrave Macmillan, 2016.
 - [60] PAUL S, VENKATESWARAN J. Inventory management strategies for mitigating unfolding epidemics[J]. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 2018, 8(3): 167-180.
 - [61] BRAUER F. Compartmental models in epidemiology[J]. *Mathematical Epidemiology*, 2008, 1945: 19-79.
 - [62] FUSCO F M, PURO V, BAKA A, et al. Isolation rooms for highly infectious diseases: an inventory of capabilities in European countries[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2009, 73(1): 15-23.
 - [63] ANPARASAN A A, LEJEUNE M A. Data laboratory for supply chain response models during epidemic outbreaks[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 270(1): 1-12.
 - [64] PAUL S, VENKATESWARAN J. Impact of drug supply chain on the dynamics of infectious diseases[J]. *System Dynamics Review*, 2017, 33(3-4): 280-310.
 - [65] PAUL S, VENKATESWARAN J. Designing robust policies under deep uncertainty for mitigating epidemics[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 140: 106221_1-106221_22.
 - [66] SIHN K H. Reorganizing hospital space: the 1894 plague epidemic in Hong Kong and the germ theory[J]. *Korean Journal of Medical History*, 2017, 26(1): 59-94.
 - [67] MELTZER M I, ATKINS C Y, SANTIBANEZ S, et al. Estimating the future number of cases in the ebola epidemic—liberia and sierra leone, 2014–2015[J]. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2014, 63(S3): 1-14.
 - [68] 谢东晓, 崔宁. 整合医疗资源应对非典危机[J]. *当代医学*, 2003, 9(6): 21-22.
 - [69] ZARIC G S, BRANDEAU M L. Resource allocation for epidemic control over short time horizons[J]. *Mathematical Biosciences*, 2001, 171(1): 33-58.
 - [70] ZARIC G S, BRANDEAU M L. Dynamic resource allocation for epidemic control in multiple populations[J]. *IMA Journal of Mathematical Applied in Medicine and Biology*, 2002, 19(4): 235-255.
 - [71] KASAIE P, KELTON W D. Simulation optimization for allocation of epidemic-control resources[J]. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 2013, 3(2): 78-93.
 - [72] LIU M, XIAO Y. Optimal scheduling of logistical support for medical resource with demand information updating[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1): 1-12.
 - [73] LIU M, LIANG J. Dynamic optimization model for allocating medical resources in epidemic controlling[J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2013, 6(1): 73-88.
 - [74] WATKINS N J, NOWZARI C, PAPPAS G J. Robust economic model predictive control of continuous-time epidemic processes[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(3): 1116-1131.
 - [75] NOWZARI C, OGURA M, PRECIADO V M, et al. Optimal resource allocation for containing epidemics on time-varying networks[C]. 2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove CA: IEEE, 2015.
 - [76] ZHANG W, LU S, PEI Y. A geometric programming approach for optimal resource allocation to control epidemic outbreaks in arbitrary networks[J/OL]. (2018-01-15). *Communications in Mathematical Biology and Neuroscience*, 2018, <https://doi.org/10.28919/cmbn/3388>.
 - [77] ENYIOHA C, JADBABAIE A, PRECIADO V, et al. Distributed resource allocation for epidemic control[C/OL]. (2015-07). 2015 European Control Conference (ECC). <http://10.1109/ECC.2015.7330868>.
 - [78] BOYD S, KIM S J, VANDENBERGHE L, et al. A tutorial on geometric programming[J]. *Optimization and Engineering*, 2007, 8(1): 67-127.
 - [79] WANG S, DE VÉRICOURT F, SUN P. Decentralized resource allocation to control an epidemic: a game theoretic approach[J]. *Mathematical Biosciences*, 2009, 222(1): 1-12.
 - [80] World Health Organization. Hospital preparedness for epidemics[R]. Geneva: WHO, 2014.