



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



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

郑斐峰, 陈克政, 刘明

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1581–1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

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

郑斐峰^{1†}, 陈克政¹, 刘 明²

(1. 东华大学 旭日工商管理学院, 上海 200051; 2. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘 要: 针对要求迅速处置突发公共卫生事件的需求, 作为有效隔离控制疫情扩散的关键举措之一, 提前规划应急医疗设施选址及规模, 对于快速响应、节约建设成本和社会资源具有重要意义. 对此, 针对需求不确定的突发疫情状况, 研究应急医疗设施的建设选址以及床位规模的优化决策问题, 以最小化建设选址与运营成本以及床位资源供求比差异为优化目标, 建立双目标整数规划模型. 根据模型特点, 设计 epsilon 约束精确算法和基于就近原则思想的启发式算法进行求解, 同时运用非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 进行对比分析. 数值实验结果验证了所设计算法的运行效率. 研究结论对于应急医疗设施建设选址及规模决策具有良好的应用指导价值, 可为管理者决策提供一定的理论依据.

关键词: 应急医疗设施建设; 双目标整数规划; 启发式算法; epsilon 约束算法; 机会约束; 公平配置

中图分类号: TU993

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0048

引用格式: 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.

Optimization of construction site selection and fair allocation of emergency medical facilities based on chance constraint under sudden epidemic situation

ZHENG Fei-feng^{1†}, CHEN Ke-zheng¹, LIU Ming²

(1. Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To meet the needs of rapid emergency treatment of public health emergencies, as a key measure to effectively control the spread of the epidemic, planning the location and scale of emergency medical facilities in advance is of great significance, and it saves construction costs and social resources. Focusing on sudden epidemic situation with uncertain demand, this work studies the optimization decision of location selection and construction scale of emergency medical facilities. We establish a bi-objective integer programming model with the objectives of minimizing both total construction costs and the difference between the ratios of demand to supply of bed resources. According to the characteristics of the model, the exact epsilon-constraint algorithm and a heuristic algorithm based on the principle of proximity are designed to solve the problem, and the classical non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used in comparative analysis. Numerical results verify the effectiveness of the proposed algorithms. The obtained conclusions can serve as valuable application guidance for the construction site selection and scale decision of the emergency medical facilities, and provide theoretical supports for managers to make operational decisions.

Keywords: construction of emergency medical facilities; bi-objective integer programming; heuristic algorithm; epsilon-constraint algorithm; chance constraint; fair allocation

0 引 言

作为应对传染性疫情防控的一项重要举措, 应急医疗设施如方舱医院等在以往的非典、新冠疫情救

治防控中发挥着难以替代的作用. 应急医疗设施通常是可快速部署的移动医疗平台, 必要时可利用民用建筑临时改建而成. 应急医疗设施的建设位置既要

收稿日期: 2023-01-12; 录用日期: 2023-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71832001, 72071144, 72271051).

责任编委: 唐万生.

[†]通讯作者. E-mail: ffzheng@dhu.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.

考虑居民点的需求,同时也要考虑与周围医院、水源、交通等设施场所的距离要求.距离过近将会影响其他重要民生设施的正常运行,距离过远则会导致基础设施建设成本的增加,以及居民前往应急医疗设施与转运重症到大型医院的通行成本增加.在现实突发疫情状况下,不确定的需求导致不同区域应急医疗设施的容量规划不尽相同,可能出现应急医疗设施运转负载过重或过轻的情况;此外,过大的建设规模会造成服务资源的浪费和容量建设成本的增加,而过小的建设规模将不利于满足居民点的需求.因此,为了快速响应、有效应对突发公共卫生事件,事先确定应急医疗设施的建设地点及其容量对于精准布局防控机制,以及避免社会恐慌、及时挽救人民生命财产安全有着重要意义.

本文的主要特色是决策应急医疗设施的容量以应对不确定需求,并保证服务资源分配的均衡性与公平性.在应急救援设施的建设研究中,不少学者基于自然灾害的发生考虑了关于应急设施选址及库存规划的问题,大多是建立鲁棒或两阶段随机规划模型. Khalilpourazari 等^[1]以最小化成本和运输时间为目标,在突发灾害发生前针对血液供应链的运输路线、献血点选址和血站库存容量的问题建立了鲁棒模型. Sanci 等^[2]考虑自然灾害发生后的道路损坏修复因素,决策应急设施物资储备点的位置以及道路损毁后应急物资的数量配置,构建了最小化选址建设的成本与配置修复成本的两阶段优化模型. Caunhye 等^[3]分别以最小化建设成本与延迟送达时间为两阶段随机规划模型的目标,同样考虑了应急设施的选址与物资储备数量问题,但其拓展研究了不同情景发生时转运至需求点的物资数量问题. Ni 等^[4]进一步将灾前设施的建立、应急设施库存的设置以及物资分配统一考虑,建立了最小化最大损坏成本的鲁棒模型. Zhong 等^[5]综合考虑了应急设施建设中的选址、运输车辆数量配置及运输路线问题,采用 NSGA-II 与混合遗传算法进行求解. 曲冲冲等^[6]考虑了受灾人员心理惩罚成本,通过量化政府心理干预程度指标对应急资源的配置问题进行研究,探究了心理恐慌因素与救援运营成本之间的关系. 王喆等^[7]在应急智能决策中考虑了稀缺资源的协作,提出了层次任务网络与分布式约束满足问题相结合的应急规划方法以满足实际需求. Dönmez 等^[8]从供、需、网络的不确定性,事前选址或资源配置的决策制定方式,成本、公平性、可靠性的不同决策目标,以及建模求解方法等多个维度总结了不确定情形下应急救援设施选址问题的研究现状及未来趋势.

有些学者在应急设施建设过程中,结合服务资源的分配和配送进行研究,并考虑了资源分配的公平性与均衡性因素. Seraji 等^[9]提出了多目标两阶段模型来解决避难场所选址及分配不均的问题,第1阶段考虑了仓库与避难场所的配送距离,第2阶段设计了最小化分配不均成本的公平分配表达. Gutjahr 等^[10]提出了双层双目标的优化模型,它侧重于在战术层面上使用灾害救济场所与居民点的距离和供应量来描述公平性. Ferrer 等^[11]探究了灾后救援物资的最后—公里配送问题,其中考虑了公平性、覆盖程度等多个度量指标. 于冬梅等^[12]针对设施中断情境下的选址分配问题,采用最小的需求覆盖水平来刻画公平性. Yang 等^[13]以供应物资的短缺成本与未及时送达的延迟成本来描述公平性,同时考虑了救援过程中的运作成本及救援效率,并采用 Benders 分解与分支定界算法进行求解.

与自然灾害发生后应急避难场所及设施的建设相比,对于突发公共卫生事件发生后建立应急医疗设施所考量的因素并不完全相同,在后者研究中往往需考虑与其他设施之间的关联因素. Gu 等^[14]在应急医疗设施的建设中,提出了对定点医院与临时医院救助点资源运送及不同地点、不同病情病人救助转运的问题思考. 朱莉^[15]考虑了受灾区域间的异质性,在救援时间窗约束下探讨了跨受灾区域救援的调配问题. 进一步地,部分学者针对疫情发展动态趋势,研究不同阶段方舱医院选址开放的问题,但未注重资源、患者公平分配的目标. 如项寅^[16]考虑了需求的不确定性,将疫情演化划分成离散的决策区间,提出方舱医院与定点医院在不同区间开放的鲁棒优化模型. 商晓婷等^[17]考虑了轻重症患者数量随疫情发展的动态变化,构建了定点医院在疫情发展不同阶段开放接收患者的双目标优化模型,即最大化患者收治率与最小化开放总费用. Liu 等^[18]对于突发疫情检测点的选址问题构建了两阶段优化模型,考虑设施容量可随疫情发展进行动态调整,以应对需求的不确定性.

通过梳理上述文献研究发现,一方面对于应急设施选址与库存容量的研究成果较多,主要考虑构建鲁棒优化或两阶段随机规划模型,少数文献考虑了量化选址条件因素及选址环境影响因素,并且对于应急医疗设施容量及其所能承担需求的决策研究较少,总体上缺少关于应急医疗设施服务资源容量成本、建设成本、量化选址要素及转运成本的综合研究. 另一方面,对于应急服务资源公平均衡分配的优化目标大多数基于确定性需求或确定性供给,对于突发疫情不确定需求或供给的决策情形,确定性模型的研究方法不

能适用,并且目前关于应急医疗设施的研究大多考虑建立鲁棒优化模型,鲜有探究在不确定需求下考虑服务资源均衡公平分配的优化目标。

由此,本文结合以上思路,将应急医疗设施的选址建设问题结合应急设施建设的现有研究,提出最小化选址建设综合成本与保证应急医疗设施服务资源均衡公平分配的双目标模型,以期能为面临突发卫生事件下应急医疗设施的建设提供决策支持。

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述

现准备从 K 个应急医疗设施候选点集合中选取合适的位置建立应急医疗设施,满足 N 个居民点的需求。保证应急医疗设施的床位能够满足服从正态分布居民点的需求^[19],并且满足与重要设施场所的距离要求,保证分配的居民需求与床位数量供求比的公平性。为了权衡成本与资源配置的公平性,建立双目标混合整数规划模型。

1.2 模型构建

结合相关应急设施选址配置研究,本文通过机会约束来刻画突发疫情状态下的不确定性需求。其中:核心变量包括设施是否建设、设施服务哪些需求,以及设施容量大小。相比于以往研究,增加了考虑选址环境因素和设施点服务强度公平均衡的决策要求。数学模型刻画如下。

1) 索引。

K : 应急医疗设施候选点集合;

N : 需求点集合;

j : 应急医疗设施选址点, $j \in K = \{1, 2, \dots, K\}$;

i : 需求点, $i \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

2) 参数。

Q_i : 需求点 i 的需求量,服从正态分布;

D_{ij} : 需求点 i 到应急医疗设施 j 的距离;

D : 需求点到应急医疗设施的最大允许通行距离;

L : 应急医疗设施到其最近医院的距离上限;

d_j : 应急医疗设施 j 与最近医院的距离;

B_j : 应急医疗设施 j 离化工等有毒、易燃易爆危险场所的距离;

E_j : 应急医疗设施 j 位置与在风向上投影最下方的距离偏差;

F_j : 应急医疗设施 j 与主干道的距离;

G_j : 应急医疗设施 j 与重要民生服务设施的距离;

H_j : 应急医疗设施 j 与教育场所的最近距离;

ω_k : 选址要素权重,其中 $1 \leq k \leq 6$;

c : 建设应急医疗设施的单位容量成本;

R : 应急医疗设施的基础建造成本;

r : 应急医疗设施与其他重要设施之间的单位距离惩罚成本;

t : 需求点患者运至应急医疗设施的单位距离成本;

ϑ : 置信水平,即所做的决策满足约束条件的概率;

M : 一个充分大的正数,用于表达设施建设床位容量的约束。

3) 决策变量。

x_{ij} : 0-1 变量,表示需求点 i 是否由应急医疗设施 j 进行服务;

y_j : 0-1 变量,表示应急医疗设施 j 是否建立;

S_j : 整数变量,表示应急医疗设施 j 所建造床位数。

所构建的混合整数规划模型如下。

目标函数

$$\min \left[\sum_{j=1}^K cS_j y_j + \sum_{j=1}^K R y_j + r \sum_{j=1}^K (\omega_1 d_j + \omega_2 E_j + \omega_3 F_j - \omega_4 B_j - \omega_5 G_j - \omega_6 H_j) y_j + t \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K D_{ij} x_{ij} \right]; \quad (1)$$

$$\min \left[\max_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)}{S_j} \right) - \min_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)}{S_j} \right) \right]. \quad (2)$$

约束条件

$$\sum_{j=1}^K x_{ij} = 1, \forall i \in N; \quad (3)$$

$$S_j \leq y_j M, \forall j \in K; \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall j \in K, i \in N; \quad (5)$$

$$d_j y_j \leq L, \forall j \in K; \quad (6)$$

$$D_{ij} x_{ij} \leq D, \forall j \in K, i \in N; \quad (7)$$

$$\text{Prob} \left\{ S_j \geq \sum_{i=1}^N x_{ij} Q_i \right\} \geq \vartheta, \forall j \in K; \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, y_j \in \{0, 1\}, S_j \in Z^+. \quad (9)$$

目标函数(1)表示最小化应急医疗设施的建设成本、选址惩罚成本以及患者运送成本之和,其中建设成本包括床位容量成本和基础建造成本,选址惩罚成本包括因设施地址远离医院、风向上投影最下方位置和主干道而产生的距离惩罚成本,以及由于设施地

址靠近危险场所、重要民生服务设施和教育场所而产生的距离惩罚成本;目标函数(2)表示最小化应急医疗设施床位资源最大供求比与最小供求比的差值,该指标用以度量服务资源分配的一种公平性,其中 $E(Q_i)$ 表示居民点需求的均值。

式(3)表示一个需求点的患者只能且必须分配到一个应急医疗设施;式(4)和(5)表示应急医疗设施必须在建设之后才具有容量以及进行服务需求;式(6)表示应急医疗设施与最近医院的距离不超过 L ;式(7)表示需求点到所分配的应急医疗设施最大通行距离不超过 D ;式(8)表示在 ϑ 置信水平下应急医疗设施的床位容量能够满足需求;式(9)为决策变量取值范围。

1.3 线性化处理

由于目标函数(2)中带有决策变量相除的表达,该非线性函数难以线性化,在使用epsilon约束法精确求解时,首先结合问题性质对原目标函数(2)进行近似转化,将各应急医疗设施供求的相对比值替换为绝对差值,即

$$\min \left[\max_{j \in K} \left(S_j - \sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) \right) - \min_{j \in K} \left(S_j - \sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) \right) \right]; \quad (10)$$

再用差值求出的分配结果计算供求比值,将占优的解集作为Pareto前沿。

同时,式(8)为非线性表达式,对其做线性化处理。结合居民点需求服从独立正态分布的假设,该地区所有居民需求的总和也服从正态分布 $N\left(\sum_i E(Q_i), \sum_i \sigma_{Q_i}^2\right)$ 。令 $Z = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} Q_i - \sum_i E(Q_i)}{\sqrt{\sum_i \sigma_{Q_i}^2}}$,则 $Z \sim N(0, 1)$,进而将式(8)转化为 $\text{Prob}\left\{\left(S_j - \sum_i E(Q_i)\right) / \sum_i \sigma_{Q_i} \geq Z\right\} \geq \vartheta, \forall j \in K$,根据Charnes等^[20]的等价理论,若 ϕ 为标准正态分布函数,则有

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sqrt{\sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}^2} \leq S_j, \forall j \in K. \quad (11)$$

其中: ϕ 为标准正态分布函数, ϑ 为置信水平。由于式(11)中仍含有非线性项,需要进一步线性化处理。参照唐秋华等^[21]的思想,已知

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}^2} \leq \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}, \forall j \in K. \quad (12)$$

结合式(12),将式(11)进行缩放可转化为

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i} \leq S_j, \forall j \in K. \quad (13)$$

可以看出,式(13)是对(11)的放缩,即满足式(13)的应急医疗设施床位容量 S_j 可满足转化后式(11)的要求。

2 算法设计

在构建的双目标优化模型中,减小建设规模有利于降低目标(1)的建设容量成本,但会增大目标(2)中床位资源的供求比,进而容易恶化后一目标值;反之,扩大建设规模在可能降低床位资源供求比差异的同时,将会增加建设容量成本。因此,最小化成本与床位资源供求比差异的目标函数二者之间存在优化冲突。在多目标优化问题求解中,epsilon约束算法应用广泛,同线性加权法相比,前者可通过不断调整步长有效控制可行解的数量与多样性^[17,22]。本节将采用epsilon约束法求解模型,并开发一种基于就近原则思想的启发式算法,检验比较上述线性化处理目标函数(2)的求解效果。在数值实验中将所设计算法与经典的NSGA-II算法运行结果进行比较。

2.1 epsilon约束法

epsilon约束法的基本思想是将其中一个目标函数作为约束来求解另一个目标,通过调节epsilon值寻找两个目标之间的联系。在使用该方法进行求解时,需要使用Pareto占优的概念。若一个解 X 占优另一个解 Y ,则有 $f_1(X) \leq f_1(Y)$ 且 $f_2(X) \leq f_2(Y)$,并且有一个不等式要满足严格小于的条件。所有不被占优的解组成的点集将构成Pareto前沿,前沿面上任意两点不存在占优关系。

在epsilon约束法中有3类重要的点:

1) Ideal Point,记为 $f^I = (f_1^I, f_2^I)$ 。其中: $f_1^I = \min\{f_1^I(X)\}$, $f_2^I = \min\{f_2^I(X)\}$ 。

2) Nadir Point,记为 $f^N = (f_1^N, f_2^N)$ 。其中: $f_1^N = \min\{f_1(X); f_2(X) = f_2^I\}$, $f_2^N = \min\{f_2(X); f_1(X) = f_1^I\}$ 。

3) Extreme Point,记为 $f^E = \{(f_1^I, f_2^N), (f_1^N, f_2^I)\}$,它是Pareto前沿的两个端点。

结合所构建模型特点,采用epsilon求解的步骤如下。

step 1: 求解Ideal Point $f^I = (f_1^I, f_2^I)$ 及Nadir Point $f^N = (f_1^N, f_2^N)$ 。

step 2: 设置 $f' = (f_1^N, f_2^I)$,计算第1个目标函数的范围,即 $f_1^N - f_1^I$,设置节点个数为 n ,得到步长

Δ (本文最小步长单位 $\Delta = 100$).

step 3: 令 $\varepsilon = f_1^N - \Delta$, 更新 $\varepsilon = f_1^N, f_1^N - \Delta, f_1^N - 2\Delta, \dots, f_1^I$, 优化单个目标(2). 对每种情形都求得模型最优解, 并将其放入集合 F 中.

step 4: 从集合中移除被占优的点, 从而得到问题的 Pareto 前沿.

2.2 基于就近原则的启发式算法

如前所述, 因目标函数(2)为非线性表达式, 难以直接求解, 故设计启发式算法同上述 epsilon 约束法进行对比. 启发式算法的思想与描述如下.

由式(13)可得, 所建立应急医疗设施的容量 S_j 满足不小于 $\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}$ 的要求, 因此可将目标函数(2)放缩为

$$\min \left[\max_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}} \right) - \min_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}} \right) \right]. \quad (14)$$

进一步将目标函数(2)等价转化为

$$\min \left[\max_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)} \right) - \min_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i) + \phi^{-1}(\vartheta) \sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)} \right) \right]. \quad (15)$$

由于分式存在相同项, 可将式(15)进一步处理, 放缩结果如下:

$$\min \left[\max_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)} \right) - \min_{\forall j \in K} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \sigma_{Q_i}}{\sum_{i=1}^N x_{ij} E(Q_i)} \right) \right]. \quad (16)$$

至此, 式(16)难以进一步等价线性化, 因而设计启发式算法如下. 首先, 按照就近原则分配需求点; 其次, 将需求点的分配方案不断重复进行调整, 对

于供求比值较大的应急医疗设施候选点, 可寻找 $\sigma_{Q_i}/E(Q_i)$ 值较大的需求点分配至该候选点, 或移除分配给该候选点 $\sigma_{Q_i}/E(Q_i)$ 值较小的需求点, 直至目标函数(2)中 max 分式与 min 分式的取值非常接近, 即该目标值不大于 0.01; 同时, 观测目标函数(1)的取值变化, 若两个目标的变化情况均优于初始解, 则将其选入可行解集合; 最后, 通过进一步比较去除被占优的解形成 Pareto 前沿.

3 算例分析

3.1 参数设置

为了验证所提出模型的合理性与科学性, 参照上海市卫生健康委员会发布的 2022 年上海市黄浦区 3 月份(春季)新型冠状病毒疫情数据, 合理考量了 3 个应急医疗设施候选点. 由于应急医疗设施对医院有距离要求, 应急医疗设施候选点以距上海市长征医院、上海交通大学医学院附属瑞金医院、上海交通大学医学院附属第九人民医院的距离作为参考, 并结合疫情期间具体应急医疗设施选址原则, 随机选取靠近 3 个候选点位置中心的 10 个居民需求点自疫情发生以来的需求数据为例进行分析. 由于不同地区用地成本及材料成本有所差异, 通过观察已往应急医疗设施建设, 得出不同应急医疗设施单位容量成本与应急医疗设施的基础建造成本间约有两个数量级的差距, 因此采用相对数值, 参考文献[17]对开放定点医院成本的设置, 假设应急医疗设施单位容量成本为 100, 基础建造成本为 10 000. 关于应急医疗设施与其他重要设施之间的单位距离惩罚成本 r , 以及需求点到应急医疗设施的单位距离成本 t , 主要通过所查询网络资料进行相应设定.

3.2 算例结果分析

下面将给出 epsilon 约束法、启发式算法以及用于对比的 NSGA-II 算法分别求解该实际算例的结果, 进而针对小规模和大规模的输入算例展开数值对比分析.

1) epsilon 约束法求解结果.

根据上海市黄浦区新增疫情的数据, 利用 CPELX 软件可以求得将目标函数(2)的相对比值转变为绝对差值后, 由 epsilon 约束法给出的 Pareto 最优解集. 如表 1 所示, 共有 7 个解点, 其中目标 1 表示选址建设综合成本, 目标 2 表示供求比的最大差值. 分配方案按位置分别表示不同居民点分配的医疗设施候选点序号, 应急医疗设施容量表示各候选点的建造床位容量. 表 1 中的各点均可作为选择的合适方案, 决策者可根据实际要求进行合理选择.

表 1 epsilon约束法求解的 Pareto 最优解集

Pareto 点	目标 1	目标 2	分配方案	应急医疗设施容量
1	154 400	0.151 2	1, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 1	528, 0, 629
2	154 500	0.090 8	1, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 1, 1	584, 0, 574
3	154 700	0.060 1	1, 3, 1, 3, 3, 1, 3, 1, 1	619, 0, 539
4	154 900	0.059 1	1, 3, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 3	538, 0, 619
5	155 500	0.008 2	1, 3, 1, 3, 1, 3, 3, 1, 1, 3	576, 0, 582
6	155 700	0.006 3	1, 3, 1, 3, 1, 3, 3, 1, 1, 3	576, 0, 584
7	155 800	0.005 4	1, 3, 1, 3, 1, 3, 3, 1, 1, 3	576, 0, 585

2) 启发式算法求解结果.

对于同一算例,由启发式算法求解得到 Pareto 前沿,如表 2 所示. 表 2 中的 3 个 Pareto 点构成了该方法的最优解集.

表 2 启发式算法求解的 Pareto 最优解集

Pareto 点	目标 1	目标 2	分配方案	应急医疗设施容量
1	154 500	0.090 8	1, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 1	584, 0, 574
2	154 600	0.012 6	1, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 1	690, 0, 467
3	155 800	0.003 9	1, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 1, 1	529, 0, 628

比较启发式算法与 epsilon 约束求解的结果可知,启发式算法的结果与 epsilon 约束相比结果各有特点,epsilon 方法通过不断更新步长 Δ ,对解集的搜索范围较为全面,而启发式算法能够更改具体的分配方案,可能会得到更优的结果. 例如,比较表 1 中 epsilon 方法得到的 Pareto 点 7 与表 2 中启发式算法求解的 Pareto 点 3,虽然目标 1 取值相同,但是启发式算法的目标 2 取值更小,表明启发式算法提出的资源建设与需求分配方案更优,弥补了 epsilon 约束法按照目标值进行搜寻时分配方案固定的不足. 在此案例中,启发式算法给出的解集质量优于 epsilon 约束法,在紧急情况下应作为建设方案决策的优先参考. 同时在决策应急医疗设施规模时也要兼顾需求分配方案,以使分配至医疗设施点的供求比保持均衡,保证资源分配的公平性.

在需求分配方案相同的情况下,不同的建设规模将影响目标 2 的取值差异. 如表 1 中的 Pareto 点 5 与 Pareto 点 6 相比,虽然二者分配方案相同,但由于应急医疗设施候选点 3 的建设规模差异,使得在两个目标上的取值发生变化. Pareto 点 6 通过增加床位容量提升了公平性,但是建设成本也有所上涨. 因此,在面临相同的需求分配方案时,可以合理地决策医疗设施容量以降低选址建设综合成本,并根据决策偏好适当权衡建设成本与公平性.

将算例再次运用 NSGA-II 算法进行求解. 设置 NSGA-II 算法的初始种群数为 20 代,最大迭代次数为 500 代,交叉比例为 0.8,变异概率为 0.65. 将 3 种求解方法得到的最优解集绘制成对应的 Pareto 前沿,如

图 1 所示. 其中:横轴表示目标 1,即选址建设综合成本,纵轴表示目标 2,即最大供求比与最小供求比的差值;3 种不同符号标志的点分别表示 3 种方法下的最优选址及资源配置方案. 根据 Pareto 占优的概念,点集距离原点更近的算法效果更优. 可以判断,启发式算法的 Pareto 前沿面优于 epsilon 约束法,而后者优于 NSGA-II 算法.

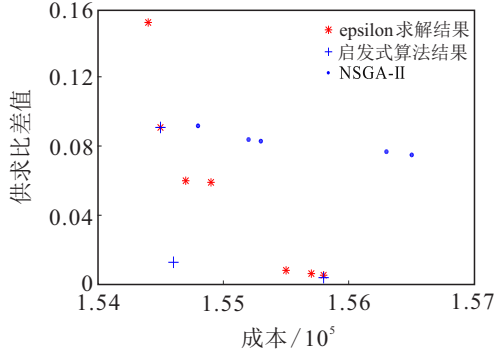


图 1 epsilon约束法、启发式算法与 NSGA-II 求解的 Pareto 最优解集对比

通过与 epsilon 算法、启发式算法的结果进行比较发现,NSGA-II 的运行时间与前两种算法相近,但是其求解效果不及前两种算法. 具体地,NSGA-II 在一些解点上的需求分配方案与前两种方法相同,但在设施建设容量上的决策不尽合理,从而导致在两个目标上的效果组合均较差.

进一步观察图 1 中启发式算法给出的 Pareto 点 1 与点 2 发现,二者均在最优前沿上,虽然建设成本相差不大,但是供求比最大差值却有明显差距. Pareto 点 2 通过优化两个设施点的床位容量配置以及需求分配方案,少量增加建设成本,大大提升了资源配置的公平性. 因此,决策者可以选择增加少许成本以获取公平性的明显提升. 值得一提的是, Pareto 点 2 相较于点 1 在床位总体容量上减少了 1 个单位,但是在两个设施点的床位容量分布上更加不均匀.

4 灵敏度分析及数值实验

4.1 灵敏度分析

为探究参数改变对决策结果的影响,对参数进行灵敏度分析. 图 2 中的蓝色虚线、红色实线及紫红色点线分别表示当其他参数保持不变时,与重要设施单位距离惩罚成本 r 、选址要素权重 ω_k 及置信水平 ϑ 分别取不同值时求得的 Pareto 前沿,黑色点划线为所有参数不改变时的 Pareto 前沿.

观察图 2 可知: 1) 当单位距离惩罚成本增加时,目标函数中的选址建设综合成本稳健提升,意味着在选择建设地点时,地理环境以及与周边设施距离等因素对方案决策具有一定影响; 2) 当改变不同选址

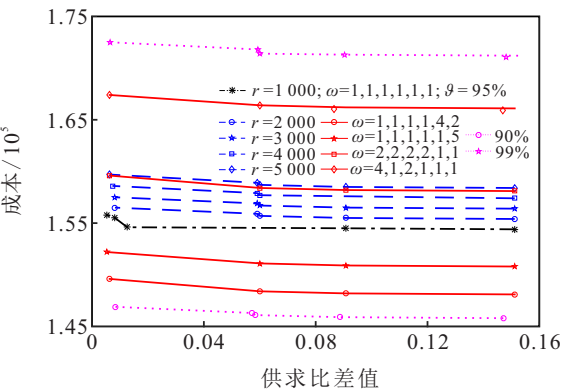


图2 单位距离惩罚成本 r 、选址要素权重 ω_k 及置信水平 θ 的灵敏度分析

要素的权重结构时,建设成本发生了显著变化,这表明针对不同的疫情防控重点区域,可以通过调整选址

惩罚成本权重来明确应急医疗设施选址工作的决策重点;3)当增加机会约束的置信水平,例如从90%变为99%,应急医疗设施的资源配置水平及成本将明显提升,因此针对不确定需求,决策者可以选择合适的置信水平以有效节约资源与控制成本。

4.2 数值实验

按照疫情变化情况随机生成10~15个小规模居民需求点和30~50个较大规模的居民需求点,分别分配到3个和5个不同应急医疗设施的候选位置,进行4组的实验结果对比,其中NSGA-II算法对于小、大规模算例分别迭代500、1000次.参考关于多目标算法性能评价的相关研究^[23],对所采用的算法进行性能测试与评价,分析结果如表3所示。

表3 算法性能比较

组别	epsilon约束法			NSGA-II算法			启发式算法		
	基数	收敛度	计算时间	基数	收敛度	计算时间	基数	收敛度	计算时间
10-1	10	0.415 5	355.08	6	0.576 6	388.15	4	0	328.23
10-2	7	0.641 5	484.40	4	0.891 6	384.64	2	0	304.84
15-1	3	1.158 4	516.70	3	1.193 7	571.04	2	0	360.20
15-2	6	0.519 4	500.39	4	0.755 5	561.93	3	0	356.60
30-1	—	—	—	8	0.386 7	4 054.50	7	0	512.76
30-2	—	—	—	16	0.360 7	4 713.34	8	0	507.79
50-1	—	—	—	4	0.100 9	9 665.66	5	0	713.50
50-2	—	—	—	5	0.712 9	9 499.39	5	0	718.71

根据表3结果对比算法性能可以发现,因epsilon约束法对解空间搜索的范围较大,其解的数量在小规模算例中较多,同时运行时间略长于启发式算法,而在收敛度上则接近于后者;NSGA-II算法与启发式算法所求得解个数总体上相当,但前者的求解迭代次数较多,其求解速度明显受算例规模的影响;启发式算法求解的解集均在构建的最优Pareto前沿参考集中,故其收敛度均为0,而且获取占优解集的时间随算例规模呈平稳增长,说明该算法具有较优的求解性能。

5 结 论

本文探究了应急医疗设施选址影响要素及建设规模决策问题,构建了考虑最小化应急医疗设施建设选址与运营成本以及床位资源供求比差异的双目标优化模型,设计了epsilon精确算法和基于就近原则的启发式算法对模型进行求解,并将所设计的算法与NSGA-II算法进行了对比分析.通过对应急医疗设施建设的数值算例分析,得到如下结论:1)应急医疗设施建设的实际选择地点需综合考虑地理、人文、环境等各种因素,选择适当位置以满足选址建设成本与运营成本的最小化;2)在决策应急医疗设施的建设规模时,应结合考虑分配到应急医疗设施的需求数量,使得分配到各个应急医疗设施的供求比保持均衡,以

体现服务资源分配的公平性;3)决策者可以根据决策偏好合理权衡建设成本与服务供求比的均衡性,通过调整应急医疗设施选址惩罚成本的各指标权重,反映决策者的选址决策重点。

本文通过机会约束方法对需求的不确定性进行了研究,但并未考虑到疫情发展的长期性及动态性等特点,对于需求不确定的刻画存在局限性,因而后续研究将对疫情发展阶段离散化,考虑随时间发展应急医疗设施动态开放或关闭的决策,以及考虑多周期、多阶段服务资源的动态配置及内部转运,进一步拓宽研究结论的应用范畴.此外,可以探究多种建设指标及分布函数的拟合效果,寻求更合理的拟合形式,以期提升研究成果的实践指导价值。

参考文献(References)

[1] Khalilpourazari S, Hashemi Doulabi H. A flexible robust model for blood supply chain network design problem[J]. Annals of Operations Research, 2023, 328(1): 701-726.

[2] Sanci E C, Daskin M S. An integer L -shaped algorithm for the integrated location and network restoration problem in disaster relief[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 145: 152-184.

[3] Caunhye A M, Zhang Y D, Li M Z, et al. A location-routing model for prepositioning and

- distributing emergency supplies[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 90: 161-176.
- [4] Ni W J, Shu J, Song M. Location and emergency inventory pre-positioning for disaster response operations: Min-max robust model and a case study of Yushu earthquake[J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(1): 160-183.
- [5] Zhong S P, Cheng R, Jiang Y, et al. Risk-averse optimization of disaster relief facility location and vehicle routing under stochastic demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 141: 102015.
- [6] 曲冲冲, 田歆, 刘淑芹, 等. 考虑灾民恐慌心理影响的应急资源配置优化研究[J]. *系统工程学报*, 2021, 36(6): 721-730.
(Qu C C, Tian X, Liu S Q, et al. Research on the emergency resource allocation considering the psychological panic spread[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(6): 721-730.)
- [7] 王喆, 蒋壮, 王世昌, 等. 应急智能规划中基于约束满足的资源协作方法[J]. *系统工程学报*, 2020, 35(6): 816-823.
(Wang Z, Jiang Z, Wang S C, et al. Resource cooperation method based on constrain satisfaction in emergency intelligent planning[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(6): 816-823.)
- [8] Dönmez Z, Kara B Y, Karsu Ö, et al. Humanitarian facility location under uncertainty: Critical review and future prospects[J]. *Omega*, 2021, 102: 102393.
- [9] Seraji H, Tavakkoli-Moghaddam R, Asian S, et al. An integrative location-allocation model for humanitarian logistics with distributive injustice and dissatisfaction under uncertainty[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 319(1): 211-257.
- [10] Gutjahr W J, Dzubur N. Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 85: 1-22.
- [11] Ferrer J M, Martín-Campo F J, Ortuño M T, et al. Multi-criteria optimization for last mile distribution of disaster relief aid: Test cases and applications[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(2): 501-515.
- [12] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1415-1420.
(Yu D M, Gao L F, Zhao S J. A multi-objective optimization model for reliable emergency facility location-allocation under disruptions[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(6): 1415-1420.)
- [13] Yang Y J, Yin Y Q, Wang D J, et al. Distributionally robust multi-period location-allocation with multiple resources and capacity levels in humanitarian logistics[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 305(3): 1042-1062.
- [14] Gu J, Zhou Y J, Das A, et al. Medical relief shelter location problem with patient severity under a limited relief budget[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 125: 720-728.
- [15] 朱莉. 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 483-490.
(Zhu L. Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 483-490.)
- [16] 项寅. 需求不确定下的突发疫情应急医疗设施动态布局[J]. *中国管理科学*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2432.
(Xiang Y. Dynamic emergency medical facilities location for epidemics under uncertain demand[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2432.)
- [17] 商晓婷, 杨凯, 张国庆, 等. COVID-19疫情下定点医院动态选址-分配优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1533-1540.
(Shang X T, Yang K, Zhang G Q, et al. Dynamic location-allocation optimization for designated hospitals under the COVID-19 Epidemic[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(6): 1533-1540.)
- [18] Liu K L, Liu C C, Xiang X, et al. Testing facility location and dynamic capacity planning for pandemics with demand uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(1): 150-168.
- [19] Chen K X, Pun C S, Wong H Y. Efficient social distancing during the COVID-19 pandemic: Integrating economic and public health considerations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(1): 84-98.
- [20] Charnes A, Cooper W W. Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints[J]. *Operations Research*, 1963, 11(1): 18-39.
- [21] 唐秋华, 林斌, 何晓霞, 等. 基于随机机会约束规划的U型装配线平衡优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(4): 955-964.
(Tang Q H, Lin B, He X X, et al. Balancing optimization of U-shaped assembly lines based on stochastic chance constrained programming[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(4): 955-964.)
- [22] Mavrotas G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 213(2): 455-465.
- [23] Liu Q, Li X F, Liu H T, et al. Multi-objective metaheuristics for discrete optimization problems: A review of the state-of-the-art[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 93: 106382.

作者简介

郑斐峰(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事调度优化决策等研究, E-mail: ffzheng@dhu.edu.cn;

陈克政(1998—), 男, 硕士生, 从事调度决策优化的研究, E-mail: 2211242@mail.dhu.edu.cn;

刘明(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事生产调度优化等研究, E-mail: mingliu@tongji.edu.cn.