

# 控制与决策

Control and Decision

COVID-19疫情下定点收治医院动态选址-分配优化

商晓婷, 杨凯, 张国庆, 贾斌

引用本文:

商晓婷, 杨凯, 张国庆, 贾斌. COVID-19疫情下定点收治医院动态选址-分配优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1533-1540.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1722>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

[基于双重约束期望改进策略的多目标并行代理优化方法](#)

Multi-objective parallel surrogate-based optimization based on dual weighted constraint expectation improvement strategy

*控制与决策*. 2022, 37(12): 3149-3159 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0852>

[考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化](#)

Robust optimization of hierarchical cooperative layout of emergency facilities considering multiple coverage

*控制与决策*. 2022, 37(7): 1853-1861 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0687>

[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>

[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>

# COVID-19 疫情下定点医院动态选址-分配优化

商晓婷<sup>1</sup>, 杨凯<sup>2†</sup>, 张国庆<sup>3</sup>, 贾斌<sup>2</sup>

- (1. 青岛大学 质量与标准化学院, 山东 青岛 266071;
2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;
3. 温莎大学 机械、汽车与材料工程系, 加拿大 温莎 N9B3P4)

**摘要:** 针对医疗资源匮乏和经济不发达的国家或地区, 如何选择定点医院、分配患者, 有效控制新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 扩散是亟待解决的问题. 首先, 考虑疫情患者数量和症状等级动态变化特征, 以最大化患者的收治率和最小化医院总费用为目标, 构建有限医疗资源约束下定点医院动态选址-分配双目标优化模型; 其次, 分析所构建模型的结构特征, 设计基于 Epsilon 约束方法的求解框架, 得到 Pareto 最优解集; 最后, 基于北京市卫生健康委发布的疫情数据进行数值实验, 以验证所提出模型的可行性与方法的有效性. 实验结果表明, 双目标优化模型可以有效地权衡定点医院的总费用与患者的收治率, 对于 COVID-19 疫情下医疗资源的合理配置具有重要的指导意义.

**关键词:** 新型冠状病毒肺炎; 定点医院; 动态选址-分配; 患者收治率; 双目标优化

中图分类号: U231+92

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1722

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 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.

## Dynamic location-allocation optimization for designated hospitals under the COVID-19 Epidemic

SHANG Xiao-ting<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>2†</sup>, ZHANG Guo-qing<sup>3</sup>, JIA Bin<sup>2</sup>

- (1. College of Quality & Standardization, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. Department of Mechanical, Automotive & Materials Engineering, University of Windsor, Windsor N9B3P4, Canada)

**Abstract:** For the countries or regions with insufficient medical resources and underdeveloped economies, it is an urgent issue to select hospitals and allocate patients to control the spread of the COVID-19 (corona virus disease, 2019). Considering the dynamic characteristics of the number and the severity of COVID-19 patients, this paper first presents a bi-objective dynamic location-allocation model for the designated hospitals with the limited medical resources, which simultaneously minimizes the total cost of designated hospitals and maximizes the treatment rate of patients. Then, this paper analyses the characteristics of the proposed model and designs a solution framework based on the Epsilon constraint approach to obtain Pareto optimal solutions. Finally, a series of numerical experiments are conducted to demonstrate the feasibility of the proposed model and effectiveness of the developed method on the basis of the epidemic data provided by Beijing Municipal Health Commission. The experimental results show that the bi-objective model can effectively trade-off the total cost of the designated hospitals and the treatment rate of patients, which can provide valuable guidance for the rational deployment of medical resources under the COVID-19 epidemic.

**Keywords:** COVID-19 epidemic; designated hospitals; dynamic location-allocation; treatment rate of patients; bi-objective optimization

## 0 引言

2020 年初, 一场突如其来的新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 给全球的公共卫生安全带来了严峻挑

战. COVID-19 大范围爆发以后, 中国全力抗击疫情, 再次刷新了“中国速度、中国效率、中国力量”. 为了有效应对疫情发展, 按照“集中患者、集中救治”

收稿日期: 2021-10-08; 录用日期: 2022-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71942006); 加拿大自然科学基金项目 (RGPIN-2019-07115); WE-SPARK 基金项目; 青岛大学人才引进科研启动基金项目 (DC2100003542).

责任编辑: 王光臣.

† 通讯作者. E-mail: kaiyang@bjtu.edu.cn.

原则,全国各省、市、县(区)均设有定点收治医院。2020年1月26日,北京市公布了20家COVID-19定点收治医院,对于提高北京及周边患者的收治能力和减少疫情的扩散起到了重要作用。为了进一步确保患者放心就医,国家为疫情防控提供了大量资金保障。截止2020年2月6日,北京市共向所属20家COVID-19定点收治医院预付5.5亿元救治专项资金。面对COVID-19患者数量的持续增加,尤其是在一些医疗资源匮乏和经济不发达的国家或地区,如何选择定点收治医院、分配患者,有效控制疫情扩散是亟待解决的问题。

定点收治医院选址-分配问题本质上从属于设施选址问题。经典的设施选址问题一般包括 $p$ -center问题<sup>[1]</sup>、 $p$ -median问题<sup>[2-3]</sup>、覆盖问题<sup>[4]</sup>等。Abernathy等<sup>[5]</sup>开启了医疗设施选址研究的先河,提出了医疗中心的空间分配模型,解决了医疗中心数量已知时,如何根据标准确定医疗中心的位置、容量和分配的问题。Chu等<sup>[6]</sup>研究了香港地区未来几年的公共医院床位的供应和需求匹配问题,对医院的位置和服务的分配进行决策。贾静<sup>[7]</sup>研究了基于突发公共卫生事件突发性、低发生率及事件发生后需要各方迅速反应等特点的应急医疗设施的选址问题。Hu等<sup>[8]</sup>整合了最大覆盖模型、 $p$ -center模型和 $p$ -median模型,以最大化需求覆盖为目标,提出了一种基于传染病扩散函数的应急救援中心选址优化的模型。陶卓霖等<sup>[9]</sup>将重力 $p$ -median模型应用到北京市延庆区医疗设施布局问题中,并与传统的 $p$ -median模型进行了比较。此外,Ahmadi-Javid等<sup>[10]</sup>对医疗设施选址问题做了详细的分类和综述。黄家祺等<sup>[11]</sup>探讨了COVID-19疫情下隔离点的设置方法,以最大覆盖率为目标,采用位置分配模型预测医院选址的优化布局,设置集中隔离点的候选位置。

鉴于多目标决策的重要性,许多研究致力于多目标设施选址优化问题。Plane等<sup>[12]</sup>和Daskin等<sup>[13]</sup>分别从消防车和救护车的角度建立集合覆盖模型,以最小化设施数目和最大化区域覆盖为优化目标。Zhang等<sup>[14]</sup>以香港为例研究公共医疗设施的多目标选址问题,提出了4个优化目标:最大化整个群体的可达性、最小化可达性的不平等性、最小化可接受距离外的人群数量和最小化新建公共医疗设施的费用。马祖军等<sup>[15]</sup>将库存问题考虑在内,以优化灾后应急保障

的时效性和系统的总成本为目标,建立了血液战略储备库优化模型。于冬梅等<sup>[16]</sup>针对经济性、覆盖质量均衡性和公平性的多目标体系,建立了中断情境下服务能力有限的可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型。

综上所述,既有文献对医疗设施选址和多目标设施选址问题已有相当充分的研究。然而,尚未有文献在COVID-19疫情背景下研究定点收治医院的选址-分配问题,尤其缺乏动态选址和分配决策的集成优化方法。鉴于此,本文结合COVID-19疫情,系统性地开展有限医疗资源下定点收治医院动态选址-分配问题研究,主要包括以下贡献:

1)从理论层面上,考虑COVID-19患者数量、症状等级动态变化和医疗资源有限等特征,建立COVID-19疫情下定点收治医院动态选址-分配双目标优化模型,拓展了医疗设施选址的建模理论;

2)从应用层面上,利用北京市卫生健康委发布的数据进行案例分析,为COVID-19疫情下医院收治能力的合理配置提供决策支持,具有重要的实践应用价值。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

COVID-19疫情下定点收治医院动态选址-分配决策过程,需要确定各时段定点收治医院的位置、患者区域的分配以及定点医院收治患者的数量,从而优化整个规划期内患者的收治率和定点收治医院的总费用。由于COVID-19患者数量和症状等级随时间动态变化,本文将规划期划分为多个时段,同时考虑患者区域、患者定点收治医院的备选节点、医疗资源限制及定点医院选址费用、患者的分配费用等因素限制,从全局角度动态配置定点医院的收治能力。

为了便于问题理解,图1给出了两个时段的COVID-19定点收治医院选址-分配网络,该网络由5个患者区域和6家备选医院组成。其中:在 $t$ 时段(图1(a)),备选医院区域1~区域3被选择为定点收治医院,区域1和区域5分配给医院1,区域2分配给医院2,区域3分配给医院3,区域4分配给医院2和医院3;在 $t+1$ 时段(图1(b)),由于COVID-19患者数量的增加,备选医院4被选择为定点收治医院,同时收治区域1和区域2的COVID-19患者。

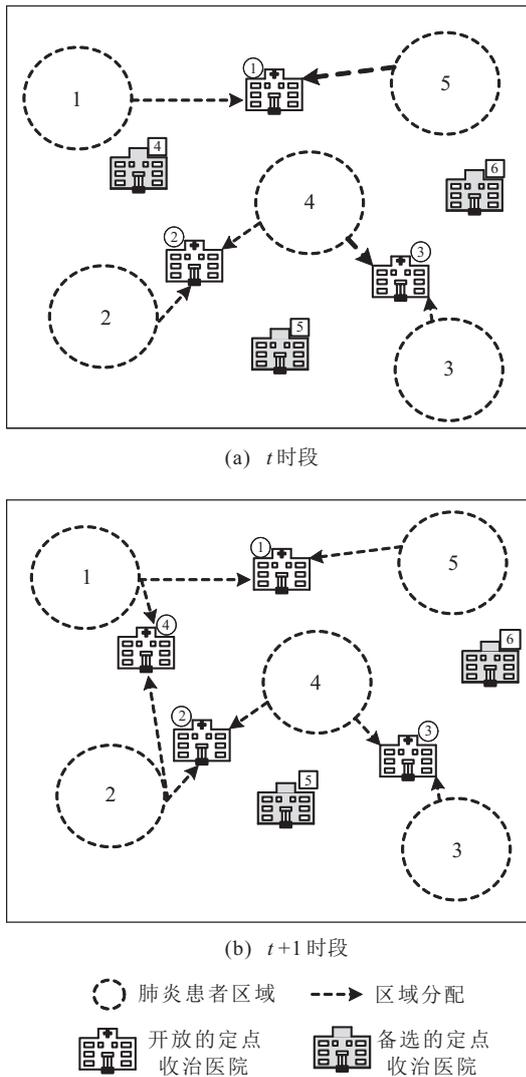


图1 定点收治医院的选址-分配网络示例

1.2 模型假设

- 1) 任何 COVID-19 患者区域分配给定点收治医院的数量有上限;
- 2) COVID-19 定点收治医院的选址具有连续性,即如果某一时段该节点被选择为定点收治医院,则下一时段该节点仍为开放的定点收治医院;
- 3) COVID-19 患者区域的分配具有连续性,即如果某一时段区域的患者被分配给医院,则下一时段该区域患者仍被分配给医院;
- 4) COVID-19 患者被划分为不同的症状等级,如果现有医疗资源紧张不足以收治所有患者,则患者的症状等级越高,收治的优先级别越高;
- 5) 定点医院收治 COVID-19 患者的能力受医疗资源的限制.

1.3 模型参数与变量

- 1) 输入集合.  
 $H$ : COVID-19 患者定点收治医院备选节点集合;

- $N$ : COVID-19 患者区域集合;
- $L$ : COVID-19 患者的症状等级集合;
- $M$ : 医疗资源的集合,例如医院床位数量、呼吸机、数量等;
- $T$ : 规划期内时段的集合,  $T = \{1, 2, \dots, t_0\}$ , 其中  $t_0$  表示时段的总数量.
- 2) 输入变量.  
 $d_i^{lt}$ :  $t$  时段, 区域  $i$  的  $l$  级症状 COVID-19 患者的数量,  $\forall i \in N, l \in L, t \in T$ ;  
 $ch_j^t$ :  $t$  时段, 节点  $j$  被开放为 COVID-19 定点收治医院的固定费用,  $\forall j \in H, t \in T$ ;  
 $cf_{ij}$ : 区域  $i$  分配给医院  $j$  时, 单位 COVID-19 患者的费用,  $\forall i \in N, j \in H$ ;  
 $r$ : 同一区域可分配定点收治医院的最大数量;  
 $\alpha_m^l$ :  $l$  级症状的 COVID-19 患者对医疗资源  $m$  的单位占用率,  $\forall l \in L, m \in M$ ;  
 $C_{jm}$ : 医院  $j$  的医疗资源  $m$  的数量,  $\forall j \in H, m \in M$ ;  
 $M_0$ : 一个较大的正整数.

3) 决策变量.

- $x_j^t$ : 二进制变量,  $t$  时段, 医院  $j$  被选择为 COVID-19 定点收治医院时等于 1, 其他情况等于 0,  $\forall j \in H, t \in T$ ;
- $y_{ij}^t$ : 二进制变量,  $t$  时段, 区域  $i$  的 COVID-19 患者被分配给医院  $j$  时等于 1, 其他情况等于 0,  $\forall i \in N, j \in H, t \in T$ ;
- $f_{ij}^{lt}$ : 自然数,  $t$  时段, 医院  $j$  收治区域  $i$  的  $l$  级症状 COVID-19 患者的数量,  $\forall i \in N, j \in H, l \in L, t \in T$ .

1.4 双目标优化模型

建立 COVID-19 疫情下定点收治医院动态选址-分配模型为

$$[P] \min f_1 = \sum_{t \in T} \sum_{j \in H} ch_j^t \cdot x_j^t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} \sum_{l \in L} cf_{ij} \cdot f_{ij}^{lt}; \tag{1}$$

$$\max f_2 = \min_{d_i^{lt} > 0, i, l, t} \left\{ \sum_{j \in H} f_{ij}^{lt} / d_i^{lt} \right\}. \tag{2}$$

$$\text{s.t. } y_{ij}^t \leq x_j^t, \forall i \in N, j \in H, t \in T; \tag{3}$$

$$x_j^t \leq x_j^{t+1}, \forall j \in H, t \in \{1, 2, \dots, t_0 - 1\}; \tag{4}$$

$$y_{ij}^t \leq y_{ij}^{t+1},$$

$$\forall i \in N, j \in H, t \in \{1, 2, \dots, t_0 - 1\}; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in H} y_{ij}^t \leq r, \forall i \in N, t \in T; \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} f_{ij}^{lt} \leq M_0 \cdot y_{ij}^t, \quad (7)$$

$$\forall i \in N, j \in H, l \in L, t \in T;$$

$$\sum_{j \in H} f_{ij}^{lt} \leq d_i^{lt}, \forall i \in N, l \in L, t \in T; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{l \in L} \alpha_m^l \cdot f_{ij}^{lt} \leq C_{jm}, \quad (9)$$

$$\forall j \in H, m \in M, t \in T;$$

$$x_j^t, y_{ij}^t \in \{0, 1\}, f_{ij}^{lt} \geq 0, \quad (10)$$

$$\forall i \in N, j \in H, l \in L, t \in T.$$

目标函数(1)最小化COVID-19定点收治医院的总费用,包括定点收治医院的开放费用和患者的分配费用;目标函数(2)最大化COVID-19患者收治率的下界;约束(3)确保任何患者区域所分配的节点是开放的定点收治医院;约束(4)保证选择定点收治医院的连续性;约束(5)保证COVID-19患者定点收治医院的分配具有连续性;约束(6)表示任何患者区域至多可以分配给r个定点收治医院;约束(7)和(8)限制定点收治医院收治COVID-19患者的数量;约束(9)表示医院可收治COVID-19患者的数量受医疗资源的限制;约束(10)表示决策变量的取值范围.

## 2 求解方法

双目标模型的两个目标函数之间存在冲突性,不能同时优化这两个目标函数.一般地,将双目标模型进行处理,转化为单目标模型,进而得到Pareto解集.常用处理方法主要有加权平均方法和Epsilon约束方法<sup>[17]</sup>.已有实验表明Epsilon约束方法比加权平均方法可以得到更多的Pareto有效解<sup>[18]</sup>.因此,本文利用Epsilon约束方法处理前文构建的双目标优化模型.具体地,其中的一个目标被选中为最终的目标函数,另外一个目标被转化为带有上、下界的约束.

图2给出了基于Epsilon约束方法的求解框架.本文选取COVID-19定点收治医院的总费用( $f_1$ )作为转化后模型的目标函数,患者的收治率( $f_2$ )作为带有下界的约束.通过转化可以得到如下单目标优化模型[P']:

$$[P']$$

$$\min \text{式(1)}.$$

s.t. 约束(3) ~ (10),

$$\sum_{j \in H} f_{ij}^{lt} \geq \varepsilon^k \cdot d_i^{lt},$$

$$\forall d_i^{lt} > 0, i \in N, l \in L, t \in T. \quad (11)$$

根据求解流程,通过不断地在可行域范围内改变右侧下界 $\varepsilon^k$ 的取值获得模型的Pareto最优解集.其中: $X_k$ 是第k次循环的最优解, $\varepsilon^k$ 是第k次循环的患者收治率下界, $\delta$ 是一个较小的常数.

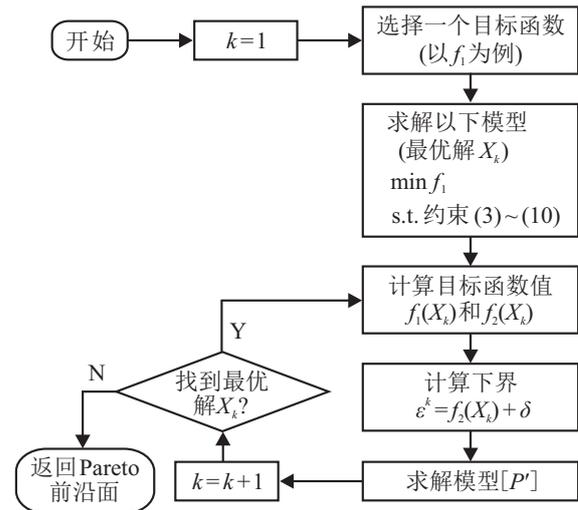


图2 基于Epsilon约束方法的求解框架

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数

基于北京市卫生健康委发布的2020年初疫情的数据,本文选取北京市15个地区(|N| = 15,平谷区除外)作为COVID-19患者区域,20家医院(|H| = 20)作为备选定点收治医院(数据来源于北京市卫生健康委:防控工作([beijing.gov.cn](http://beijing.gov.cn))).图3给出了北京市区域和备选定点收治医院分布情况(截止2020年11月17日:疫情通报([beijing.gov.cn](http://beijing.gov.cn))).

疫情爆发初期,医疗资源严重不足,定点收治医院的选址和分配患者尤为重要.因此,本文选取疫情爆发初期作为规划期,分为4个时段(|T| = 4):1月21~1月25日为第1时段;1月26~1月30日为第2时段;1月31日~2月4日为第3时段;2月5~2月9日为第4时段.假设COVID-19患者需要的主要医疗资源包括两种(|M| = 2):病床(m = 1)和呼吸机(m = 2).COVID-19患者症状等级分为两级(|L| = 2):轻症(l = 1)和重症(l = 2),特别地,重症患者数量设置为患者总数的10%.模型所需的其他参数设置如表1所示.此外,cf<sub>ij</sub>取值为该区域中心点至医院的救护车费用,所有关于费用的单位均为10<sup>2</sup>RMB.



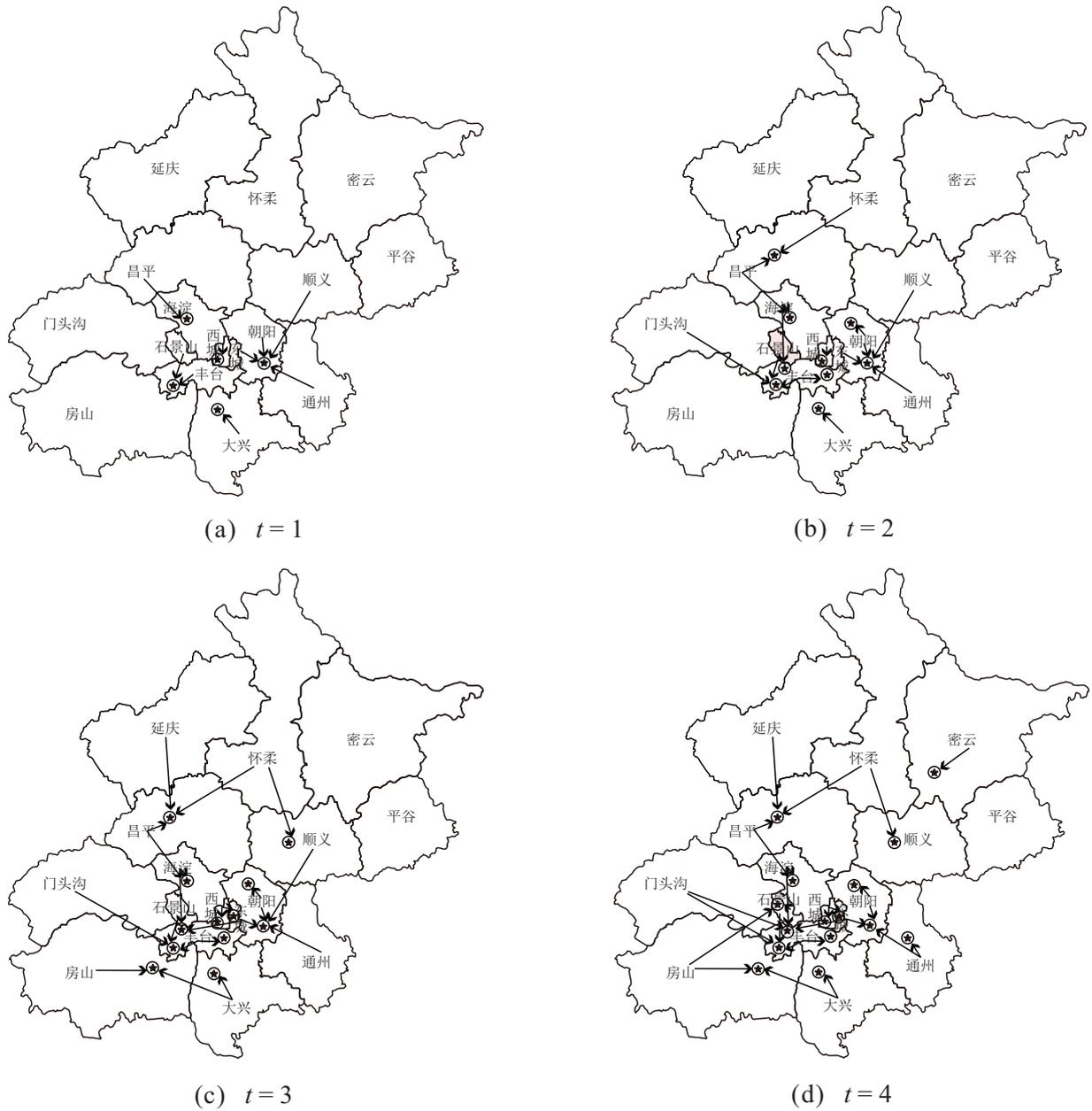


图4 定点收治医院的选址和分配

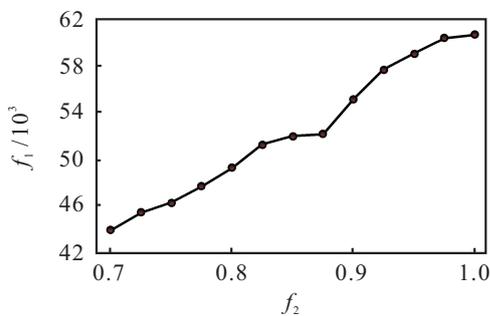


图5 模型 [P] 的 Pareto 前沿面

### 3.3 敏感度分析

Pareto 前沿面对各参数的敏感度是定点收治医院的动态选址-分配方案确立的重要环节. 本节深入分析模型 [P] 的各参数对 Pareto 前沿面的影响, 主要包括最大分配数量 ( $r$ )、单位患者费用 ( $cf_{ij}$ ) 和定点收

治医院的固定选址费用 ( $ch_j^t$ ) 三个参数.

图6给出了 Pareto 前沿面对最大分配数量 ( $r$ ) 的敏感度. 可以看出: 随着分配数量 ( $r$ ) 的增大, Pareto 前沿面向下移动, 当  $r$  取值由 2→3 时, 下移幅度最大; 但随着  $r$  值的继续增大, 下移幅度逐渐降低.

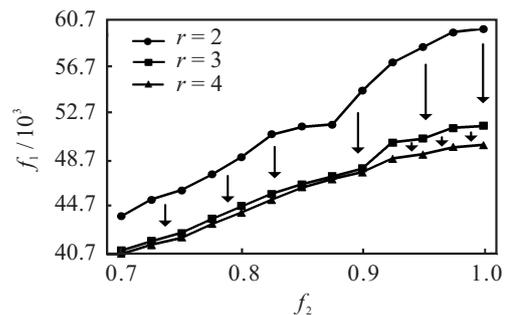


图6 Pareto 前沿面对最大分配数量 ( $r$ ) 的敏感度

图7给出了Pareto前沿面对单位患者费用( $cf_{ij}$ )的敏感度和定点收治医院数量对 $cf_{ij}$ 的敏感度( $f_2 = 80\%$ )。可以看出,随着单位患者费用( $cf_{ij}$ )的增大,Pareto前沿面向上移动,这与实际情况相符。值得注意的是,选择定点收治医院的数量也随着 $cf_{ij}$ 值的增大而增加,尤其在COVID-19患者数量较大时(第3、第4时段)。

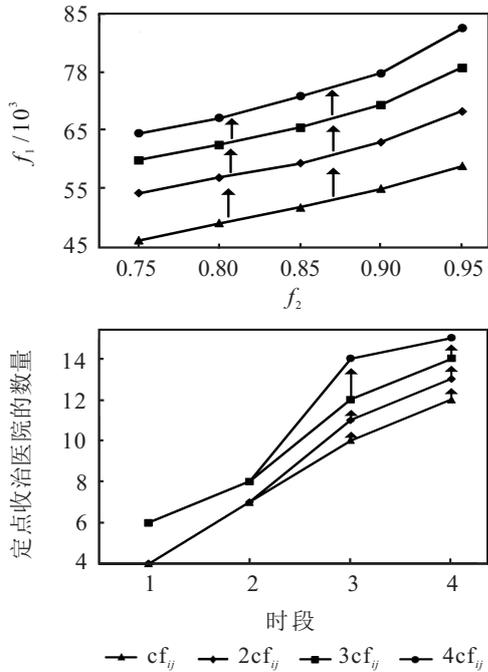


图7 Pareto前沿面和定点收治医院数量对 $cf_{ij}$ 的敏感度

图8给出了Pareto前沿面对开放定点收治医院固定费用( $ch_j^t$ )的敏感度和定点收治医院数量对 $ch_j^t$ 的敏感度( $f_2 = 80\%$ )。可以看出,随着定点收治医院的固定选址费用( $ch_j^t$ )增大,Pareto前沿面向上移动。特别地,选择定点收治医院的数量也随着 $ch_j^t$ 的增大而减少,尤其在COVID-19患者数量较大时(第3、第4时段)。

通过上述敏感度分析可以发现:模型的Pareto前沿面将随着最大分配数量( $r$ )的减小、单位患者费用( $cf_{ij}$ )和固定选址费用( $ch_j^t$ )的增大而向上移动,其中当 $r$ 较小时,Pareto前沿面尤为敏感;定点收治医院的数量将随着单位患者费用( $cf_{ij}$ )的增大和固定费用( $ch_j^t$ )的减小而增大,尤其在COVID-19患者数量较大时,选择定点收治医院数量尤为敏感。基于此,可以得出如下管理启示:1)在避免COVID-19疫情扩散的前提下,决策者采取动态选址-分配策略可以更加合理地配置医疗资源;2)在COVID-19救治专项资金不足的情况下,决策者可以根据所提出模型对相应成本参数的敏感度,合理配置医院的收治能力。

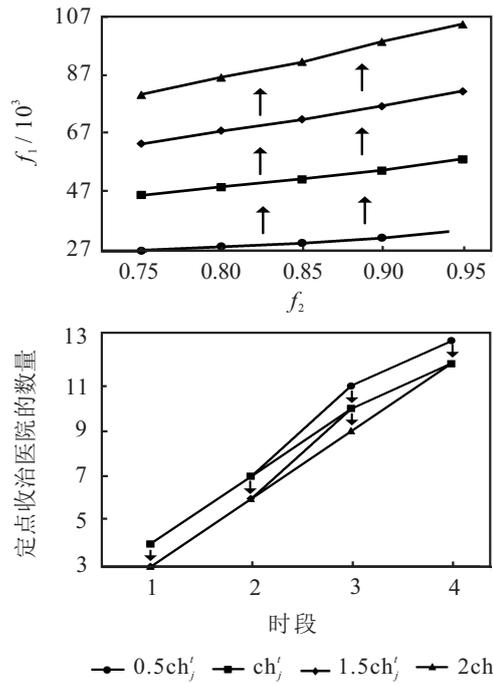


图8 Pareto前沿面和定点收治医院数量对 $ch_j^t$ 的敏感度

### 4 结论

本文在COVID-19疫情下,综合考虑患者数量、患者症状等级动态变化和医疗资源有限的特性,研究了定点收治医院的动态选址-分配优化问题。首先,以定点收治医院的总费用和COVID-19患者的收治率为优化目标,建立了带有医疗资源限制的动态选址-分配双目标优化模型;然后,分析模型的特征,设计了基于Epsilon约束方法的求解框架,求得模型的Pareto最优解集;最后,选取COVID-19爆发初期北京地区的患者数据进行了数值实验和案例分析。实验结果表明:

- 1)所提出的动态优化模型具有可行性和优越性;
- 2)双目标优化模型可以有效地权衡定点医院总费用与患者收治率,得到费用-收治率折中的定点收治医院的动态选址-分配方案;
- 3)模型参数的敏感度分析有助于决策者选择高效的动态选址-分配方案。

接下来的研究将进一步考虑COVID-19疫情下,各医院的短缺医疗资源的调度和资源配置问题。此外,针对所研究的问题设计高效的精确算法也是未来的研究方向。

### 参考文献(References)

[1] Davoodi M, Mohades A, Rezaei J. Solving the constrained  $p$ -center problem using heuristic algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3321-3328.

[2] Mladenovi N, Brimberg J, Hansen P, et al. The  $p$ -median problem: A survey of metaheuristic approaches[J].

- European Journal of Operational Research, 2007, 179(3): 927-939.
- [3] 林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 等. 需求不确定下的低碳物流配送中心选址[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 492-500.  
(Lin D S, Zhang Z Y, Wang J X, et al. Low-carbon logistics distribution center location with uncertain demand[J]. Control and Decision, 2020, 35(2): 492-500.)
- [4] Farahani R Z, Asgari N, Heidari N, et al. Covering problems in facility location: A review[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1): 368-407.
- [5] Abernathy W J, Hershey J C. A spatial-allocation model for regional health-services planning[J]. Operations Research, 1972, 20(3): 629-642.
- [6] Chu S C K, Chu L S. A modeling framework for hospital location and service allocation[J]. International Transactions in Operational Research, 2000, 7(6): 539-568.
- [7] 贾静. 突发公共卫生事件的应急医疗设施选址问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.  
(Jia J. The study on emergency medical facility location of instant public health event[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.)
- [8] Hu J X, Zhao L D, Jiang Y P. Location of emergency rescue center based on SIR epidemiological model[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2007, 23(S1): 89-93.
- [9] 陶卓霖, 程杨, 戴特奇, 等. 重力  $p$ -median 模型在设施选址中的应用及检验[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(6): 1600-1608.  
(Tao Z L, Cheng Y, Dai T Q, et al. Application and validation of gravity  $p$ -median model in facility location research[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(6): 1600-1608.)
- [10] Ahmadi-Javid A, Seyedi P, Syam S S. A survey of healthcare facility location[J]. Computers & Operations Research, 2017, 79: 223-263.
- [11] 黄家祺, 肖霜, 张俊, 等. COVID-19 疫情下医院服务区分布与隔离点设置方法的初步探讨[J]. 山东大学学报: 医学版, 2020, 58(10): 105-111.  
(Huang J Q, Xiao S, Zhang J, et al. Preliminary discussion on hospital service areas distribution and the setting of isolation points under the COVID-19 epidemic[J]. Journal of Shandong University: Health Sciences, 2020, 58(10): 105-111.)
- [12] Plane D R, Hendrick T E. Mathematical programming and the location of fire companies for the Denver fire department[J]. Operations Research, 1977, 25(4): 563-578.
- [13] Daskin M S, Stern E H. Emergency medical service vehicle deployment[J]. Transportation Science, 1981, 15(2): 137-152.
- [14] Zhang W T, Cao K, Liu S B, et al. A multi-objective optimization approach for health-care facility location-allocation problems in highly developed cities such as Hong Kong[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 59: 220-230.
- [15] 马祖军, 周愉峰. 国家血液战略储备库选址——库存问题[J]. 管理科学学报, 2018, 21(3): 54-68.  
(Ma Z J, Zhou Y F. Location-inventory problem for national strategic blood reserves[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(3): 54-68.)
- [16] 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.)
- [17] Steuer R E. Multiple criteria optimization: Theory, computation and applications[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1986: 1-5.
- [18] Mavrotas G. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 213(2): 455-465.

### 作者简介

商晓婷(1992—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统建模与优化、供应链管理优化等研究, E-mail: xtshang@qdu.edu.cn;

杨凯(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事交通系统科学与工程、交通运输规划与管理等研究, E-mail: kaiyang@bjtu.edu.cn;

张国庆(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理优化、智能制造与智能决策支持系统等研究, E-mail: gzhang@uwindsor.ca;

贾斌(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化、交通流理论等研究, E-mail: bjia@bjtu.edu.cn.