

常态化疫情防控背景下区域应急医疗物资选址-分配模型^{*}

宋英华^{1,2} 裴俊龙^{1,2} 方丹辉^{1,2} 王侃^{1,2}

(1. 武汉理工大学 中国应急管理研究中心 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院 湖北 武汉 430070)

摘要: 在常态化疫情防控背景下,为避免本土病例造成区域不同需求主体防护物资短缺问题,构建最小化医院物资集散点需求未满足率加权和、最大化物资购买集中点分配公平性的储备库选址-分配模型,并基于某市相关数据,利用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)进行仿真研究。结果表明:某市应选择储备库数目为5,在物资分配时考虑物资防护等级要求,可减少医院物资集散点物资浪费,增加物资购买集中点获得量。

关键词: 应急医疗物资; 防护等级要求; 选址-分配问题(LAP); 非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)

中图分类号: X913 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-493X(2021)-11-0005-05

Location-allocation model of regional emergency medical material under background of normalized epidemic prevention and control

SONG Yinghua^{1,2}, PEI Junlong^{1,2}, FANG Danhui^{1,2}, WANG Kan^{1,2}

(1. China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: Under the background of normalized epidemic prevention and control, in order to avoid the shortage of protective materials for subjects with different needs caused by local cases in the region, a location-allocation model of storage depots considering minimizing the weighted sum of unmet demand rate for the hospital material distribution points and maximizing the fairness for the distribution of material purchasing focus points was constructed. Based on the relevant data of Wuhan city, the improved non-dominated genetic algorithm (NSGA-Ⅱ) was used for the simulation research. The results showed that the number of storage depots should be 5 in Wuhan, and considering the requirements of material protection level in the material distribution could reduce the material waste in the hospital material distribution points and increase the acquisition quantity of material purchasing focus points.

Key words: emergency medical material; protection level requirement; location-allocation problem (LAP); non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ)

0 引言

我国正处于突发事件高发期,突发事件造成人员伤亡与经济损失巨大^[1]。针对2020年新冠疫情,由于早期缺乏应对措施,使疫情短时间内迅猛蔓延^[2]。目前,我国疫情形势趋于稳定,但由于疫情持续在全球发酵,我国依然存在大规模新冠感染的可能。因此,基于常态化疫情防控、社会产能充足等多因素背景,考虑区域本

土病例影响,迅速启动全员核酸检测方案。疫情期间合理调集物资,并将有限的、防护级别较高的物资尽可能配送至医务人员手中,同时兼顾该区域普通民众防疫需求,杜绝物资浪费、防止疫情扩散是亟待解决的问题。

国内外针对应急物流研究较全面,大部分学者聚焦于自然灾害事件,主要研究内容包括应急物流设施选址、资源调度、选址调度^[3-6]等,以突发公共卫生事件为背景的研究相对较少。相关自然灾害背景下应急物流

收稿日期: 2021-04-20; 网络首发日期: 2021-08-31

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807001)

作者简介: 宋英华,博士,教授,主要研究方向为科研管理、应急管理、项目管理。

研究成果为构建突发公共卫生事件应急物流模型提供借鉴: 陈丰等^[7]结合各医疗点对医疗物资不同需求, 建立考虑物资延迟损失和物流成本的医疗物资优化调度分配模型; Ekici 等^[8]构建以总成本最小化为目标的疫情扩散与应急物资分配网络选址组合优化模型; Garza 等^[9]基于精益思维和约束理论, 改善紧急医疗服务运转效率; 赵建友等^[10]构建使总配送费用最少与需求紧迫度高的需求点优先配送的双重目标模型; 胡晓伟等^[11]以加权需求满足率最大化为主要目标, 车辆行驶距离最小化为次要目标, 构建应急医疗物资动态分配模型。

突发公共卫生事件背景下应急医疗物资模型, 大多仅适用于疫情爆发初期, 且忽略区域普通市民对防疫物资需求和不同需求主体对同一防疫物资不同防护等级要求。因此, 本文拟在常态化疫情防控、物资充足背景下, 考虑区域内防疫物资库存量、定点医院对物资防护等级要求、模糊需求以及需求紧迫性等多种因素和普通市民物资购买需求, 构建满足医务人员并兼顾普通市民防疫物资购买需求的模糊多目标应急医疗物资选址-配送模型, 以期在充足资源下合理调集外部防疫物资, 实现常态化疫情防控背景下物资最优调度与分配。

1 模型建立

1.1 问题描述

常态化疫情防控下, 按照行政管辖范围将研究地区划分为 $i (i \in I)$ 个区域, 当在多个区域 i 中发现本土新冠患者后, 且难以根据流行病学进行溯源追踪, 随即启动全区域全员核酸检测。当现有防疫物资剩余量无法满足防疫需求时, 由政府选择合适储备库进行外部应急医疗物资(以下简称物资)合理调度, 且设置定点医院物资集散点(以下简称医院集散点)、市民物资购买集中点(以下简称物资集中点)分别对医院、公众进行物资补给。应急医疗物资调度配送过程如图 1 所示。

1.2 模型构建

1) 模型假设

为方便问题研究, 做如下基本假设: ①常态化防控背景下, 某地区进行全员核酸检测持续时间较短, 因此不考虑物资周期性调运及公众网购物资数量。②外部防疫物资均能满足普通民众防疫需求, 但有防护等级划分。③候选物资储备库、物资集中点、医院集散点位置已知。

2) 需求紧迫程度

基于突发公共卫生事件背景下应急医疗物资配送模型, 考虑区域划分实际背景, 拟从是否位于病例发现区域、区域人口密度以及区域医院医务人员总数 3 个方面, 利用加权法确定区域内医院集散点需求紧迫程度,

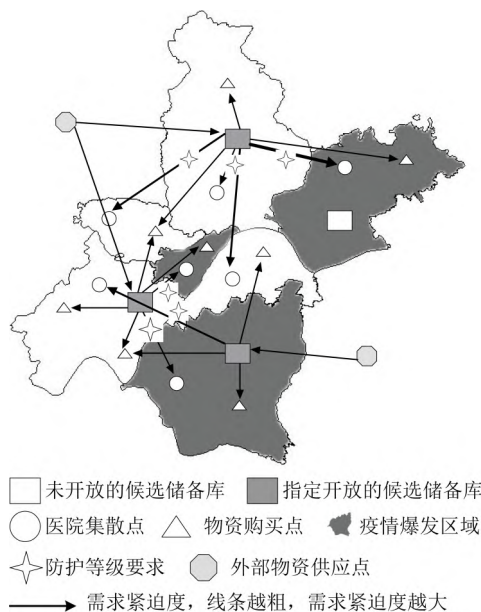


图 1 应急医疗物资调度配送过程

Fig. 1 Dispatching and distribution of emergency medical material

如式(1)~(3)所示:

$$\alpha_{ih} = \frac{p_{ih}}{\max_{h \in H} p_{ih}} \quad (i \in I, h \in H) \quad (1)$$

$$\beta_{ih} = \frac{\rho_i}{\max_{h \in H} \rho_i} \quad (i \in I, h \in H) \quad (2)$$

$$\varphi_{ih} = w_1 \alpha_{ih} + w_2 \beta_{ih} + w_3 y_{ih} \quad (3)$$

式中: α_{ih} 表示参数 p_{ih} 归一化; p_{ih} 表示 i 区域内医院集散点 h 内医务人员总数, 人; I 表示区域划分集合; H 表示医院集散点集合; β_{ih} 表示参数 ρ_i 归一化; ρ_i 为区域内人口密度, 人/ km^2 ; φ_{ih} 表示 i 区域内医院集散点 h 对物资的需求紧迫度; w_1, w_2, w_3 表示权重系数, $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$ 且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; y_{ih} 表示 0-1 变量, 当医院集散点 h 位于本土病例区域中时取 1, 否则取 0。

考虑定点医院对物资防护等级要求, 设置各医院物资集散点对不同防护等级物资需求紧迫度, 如式(4)所示:

$$\varphi_{ih}^k = \frac{k}{\max_{k \in K} k} \cdot \varphi_{ih} \quad (\forall i \in I, h \in H, k \in K) \quad (4)$$

式中: φ_{ih}^k 表示 i 区域医院物资集散点 h 对 k 防护等级物资需求紧迫程度; k 表示物资防护等级; K 表示医院集散点对物资防护等级需求集合。

3) 模型建立

主要目标函数表示医院集散点需求未满足率加权和最小, 如式(5)所示:

$$\min Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \varphi_{ih}^k w_{ih}^k \quad (5)$$

式中: w_{ih}^k 表示区域内医院集散点对防护等级物资需

求未满足率。

次要目标函数表示储备库作为外部防疫物资集散中心,分出部分物资供应物资购买点时,最大化物资购买点物资分配公平性,如式(6)所示:

$$\min Z_2 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left[\left(\frac{D_{ijp}^k}{B_{ip}} - \min \left(\frac{D_{ijp}^k}{B_{ip}} \right) \right) \right] \quad (6)$$

式中: D_{ijp}^k 表示 i 区域 j 储备库向物资集中点 p 供应 k 防护等级物资数量, $\times 10^3$ 个; B_{ip} 表示 i 区域内物资集中点 p 物资模糊需求总量, $\times 10^3$ 个; K 表示物资防护等级集合, $K \supset K'$; P 表示物资购买点集合。

约束条件 w_{ih}^k 如式(7)所示:

$$w_{ih}^k = \frac{\bar{B}_{ih}^k - (A_{ih}^k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ijh}^k)}{\bar{B}_{ih}^k} \quad (7)$$

$$(A_{ih}^k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ijh}^k \leq \bar{B}_{ih}^k; k \in K')$$

式中: \bar{B}_{ih}^k 表示 i 区域医院集散点 h 对 k 防护等级物资模糊需求总量, $\times 10^3$ 个; D_{ijh}^k 表示 i 区域 j 储备库向医院集散点 h 供应 k 防护等级物资数量, $\times 10^3$ 个; A_{ih}^k 表示 i 区域医院集散点 h 对 k 防护等级物资库存量, $\times 10^3$ 个。

至少存在 1 个选定储备库向需求点供应物资,且供应储备库总数不超过指定开放数目,如式(8)所示:

$$1 \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} x_{ijd}^k \leq N \quad (\forall d \in D, k \in K) \quad (8)$$

式中: N 表示指定开放储备库数目,个; x_{ij} 表示 0-1 变量,当 i 区域内 j 储备库被选中时为 1,否则为 0; x_{ijd}^k 表示 0-1 变量,当 i 区域内 j 储备库向需求点 d 运送 k 防护等级物资时为 1,否则为 0; D 表示物资需求点集合 $D = H \cup P$ 。

当储备库被选中时才能向需求点输送物资,如式(9)所示:

$$x_{ijd}^k \leq x_{ij} \quad (k \in K) \quad (9)$$

开放储备库运送至需求点物资总量不大于其拥有量时,如式(10)所示:

$$\begin{cases} \sum_{h \in H} x_{ij} x_{ijh}^k D_{ijh}^k \leq V_{ij}^k \\ \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{ij} x_{ijd}^k D_{ijd}^k \leq V_{ij} \end{cases} \quad (k \in K', \forall i \in I, j \in J) \quad (10)$$

式中: V_{ij}^k 表示 i 区域 j 储备库中 k 防护等级物资数量, $\times 10^3$ 个; V_{ij} 表示 i 区域 j 储备库物资总量, $\times 10^3$ 个; D_{ijh}^k 表示 i 区域 j 储备库向需求点 d 供应 k 防护等级物资数量, $\times 10^3$ 个; J 表示物资购买点集合。

对医院集散点而言,不符合需求等级的物资输送量应为 0,如式(11)所示:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ij} x_{ijh}^k D_{ijh}^k = 0 \quad (\forall h \in H, k \in K - K') \quad (11)$$

物资购买点物资最低满足量如式(12)所示:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \frac{A_{ip} + \sum_{i \in I} D_{ijp}^k}{B_{ip}} \geq \varepsilon \quad (\forall i \in I, p \in P) \quad (12)$$

式中: ε 表示 i 区域物资集中点 p 最低物资满足率, $0 < \varepsilon \leq 1$ 。

2 模型求解

2.1 去模糊化

本文借鉴去模糊化方法,选用三角模糊数描述模糊需求量^[12]。当决策者给定置信水平 α 后, $\alpha \in (0, 1)$, 采用最可能值法确定权重^[13]。

2.2 模型求解方法

针对模型特点,对传统 NSGA-II 算法进行改进,具体算法流程如以下 7 个步骤:

1) 染色体编码: 针对模型特点,假设有 q 类物资,且对同类防疫物资,按照防护等级从低到高 r_i 依次用 $1 - r_i$ (r_i 为 i 类物资的最高防护等级数, $i = 1, 2, \dots, q$) 表示。则染色体共有 $\sum_{i=1}^q r_i + 1$ 个 $\sum_{i=1}^q r_i$ 子串,其中子串 1 采用二进制实数编码,总长度为 n (n 为候选储备库数目),其余子串采用实值编码,长度为 $n^* m$ (m 为需求点数目),从而确定染色体总长度为 $\sum_{i=1}^q r_i \times n \times m + n$ 。染色体编码如图 2 所示。

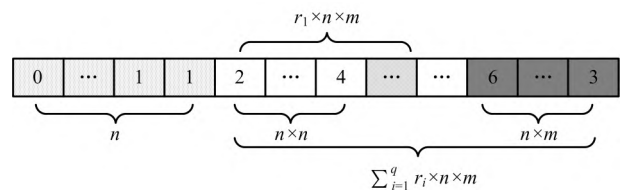


图 2 染色体编码

Fig. 2 Schematic diagram of chromosome coding

2) 初始化种群。设定初始种群大小为 N ,按照距离最近原则进行物资集中点最小需求量配送,后对各需求点进行随机配送。

3) 适应度计算。将目标函数作为适应度函数。

4) 非支配排序。采用精英保留策略,将初始化的种群进行非支配排序,得到非支配排序层级和拥挤度。

5) 遗传操作。①选择: 采用二元锦标赛选择法进行个体选择,选择个体数目为 $N/2$,并取整。②交叉: 设置交叉概率,采用双点交叉和算术交叉。③变异: 设置变异概率,采用基因位变异和边界变异。

6) 种群合并。对子代种群进行非支配排序,将父代种群和子代种群进行合并(大小为 $2N$),依据非支配排序结果,选择前 N 个个体。

7) 迭代和终止。开始新一轮非支配排序选择、交叉、变异,当迭代达到设置最大迭代次数时,停止迭代,并输出 Pareto 前沿面。

3 算例分析

3.1 算例概况

依据某市各区区域划分,考虑 6 个候选储备库,其中包括 1 个省级储备库 3 个市级储备库 2 个区县级储备库,编号为 1~6。在全市 13 个区,设置 10 个医院物资集散点,编号为 1~10。考虑核酸检测期间,普通公众防疫需求及恐慌心理,在各区分别设置 1 个物资集中点,编号为 11~23。选取某市机场和 2 个火车站所在区作为模拟疫情爆发区域。考虑单一应急医疗物资(口罩),依据《预防新型冠状病毒感染的肺炎口罩使用指南》,将一次性使用医用口罩、医用外科口罩、KN95/N95 颗粒物防护口罩、医用防护口罩按照防护等级依次划分

为 1、2、3、4。其中,将防护等级 3、4 物资依次用 A、B 表示,将各区物资购买集中点获得总量用 C 表示。

结合 2020 某市行政统计表^[14]和模拟各区物资剩余量,考虑全员核酸检测持续时间,模拟确定各区普通市民对物资模糊需求量。为求解方便,将全市医务人员按照各区人口占人口总数比例进行分配,从而确定医院集散点模糊需求量。求解医院集散点需求紧迫程度时,将权重设置为 $w_1 = 0.2$ $w_2 = 0.3$ $w_3 = 0.5$ 。

3.2 结果分析

使用 Matlab R2019a,实现满足全部约束条件的 NSGA-II 算法,基本参数设置为种群规模大小 100,最大迭代次数 200,交叉概率 0.8,变异概率 0.2。

经过最大迭代次数后的种群个体均能满足模型,因此为比较不同数量储备库对主要、次要目标函数值影响,在最大迭代次数结束后,选择种群中后 5 种可行方案,对主要、次要目标函数值求平均,结果见表 1。

表 1 选择不同数量的储备库的最优方案对比(后 5 种可行方案平均值)

Table 1 Comparison of optimal schemes for choosing different numbers of storage depots
(average values of last 5 feasible schemes)

指定开放储备库数目	储备库级别	开放储备库编号	主要目标函数值	次要目标函数值
3	省级、区县级、市级	3、4、5	0.648 2	1.304 6
4	市级、省级、市级、区县级	2、3、5、6	0.334 2	2.479 4
5	市级、省级、区县级、市级、区县级	2、3、4、5、6	0.011 2	1.362 2
6	市级、市级、省级、区县级、市级、区县级	1、2、3、4、5、6	0.003 0	2.629 0

通过比较选择不同数目储备库最优方案可以发现,选择 5 个储备库时,目标函数值较小,相对开放 3、4、6 个储备库方案而言,主要目标函数值对应减少 98.27%、减少 96.64%、增加 73.21%,次要目标函数值分别增加 4.23%、减少 45.06%、减少 48.19%。因此,当选择储备库数目为 5 时,配送效果最优,最优解的 Pareto 前沿面如图 3 所示。

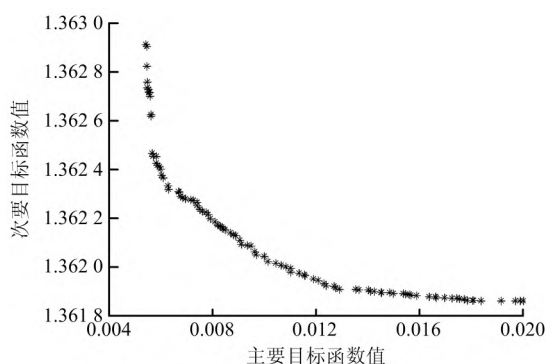


图 3 Pareto 最优解

Fig. 3 Pareto optimal solution

由图 3 可知,主要目标和次要目标相互制约并相互关联,决策者在进行区域应急医疗物资综合决策时,可根据实际情况对每个目标进行赋权以选择最优方案。

为验证物资等级要求对医院集散点物资分配结果和目标函数影响,去掉约束条件(11),设置相同参数进行计算,并得到分配方案。各自选择 5 种可行方案进行分析,考虑等级要求方案对比见表 2。由表 2 可知,主要目标函数值增加 125.17%,次要目标函数值减少 8.27%。表明在不考虑防护等级要求情况下,主要目标函数获得量增大,但大部分物资不满足医务人员防护需求,不利于防疫工作进行,造成物资浪费;次要目标函数虽然减少,分配更加公平,但各区物资购买集中点获得物资总量减少。

4 结论

1) 在常态化疫情防控背景下,从是否位于病例发现区域、区域人口密度以及区域医务人员总数 3 个方面,利用加权法确定医院集散点需求紧迫度;在外部防疫物资充足情况下,构建满足医务人员且兼顾普通市民防疫

表 2 有无等级需求方案对比(5 种可行方案平均值)

Table 2 Comparison of schemes with or without level requirements (average values of 5 feasible schemes)

等级需求	储备库数目	医院集散点物资量				物资集中点物资量		主要目标 函数值	次要目标 函数值
		等级 3 / A ($\times 10^3$ 个)	等级 4 / B ($\times 10^3$ 个)	获得总量 ($\times 10^3$ 个)	需求总量 ($\times 10^3$ 个)	获得总量 ($\times 10^3$ 个)	需求总量 ($\times 10^3$ 个)		
有	5	655	1 884	2 539	2 918	17 137	27 685	0.011 2	1.362 2
无	5	622	1 765	6 257	2 918	12 696	27 685	0.151 4	1.249 5
变化率 / %	-	-5.04	-6.32	+146.44	-	-25.91	-	+125.17	-8.270 0

物资需求的模糊多目标应急医疗物资选址 - 配送模型, 为常态化疫情防控背景下外部防疫物资合理调度和内部物资最优配送提供借鉴。

2) 通过对 NSGA - II 算法进行改进, 求解是否考虑需求点不同物资防护等级要求的 LAP 模型, 以某市为例进行模型求解, 选取最佳储备库数目为 5 进行物资分配时, 相对不考虑防护等级要求的分配方案, 考虑防护等级要求能有效避免不符合需求的物资运送到医院集散点, 且能增加 25.91% 的物资购买点的获得量。

参考文献

- [1] 吕伟, 李志红, 马亚萍, 等. 考虑受灾点需求时间窗的应急物资配送车辆路径规划研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 5-11.
LYU Wei, LI Zhihong, MA Yaping, et al. Research on route planning of emergency material delivery vehicles considering the demand time window of disaster point[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 5-11.
- [2] 朱晔. 突发公共卫生事件下应急物资运输保障对策[J]. 城市交通, 2020, 18(5): 102-109.
ZHU Ye. Emergency material transportation guarantee countermeasures under public health emergencies[J]. Urban Transport, 2020, 18(5): 102-109.
- [3] 宋英华, 苏贝贝, 霍非舟, 等. 考虑动态需求的应急物资配送中心快速选址研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 172-177.
SONG Yinghua, SU Beibei, HUO Feizhou, et al. Research on rapid location selection of emergency material distribution center considering dynamic demand[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(8): 172-177.
- [4] GHASEMI P, KHALILID K, HAFEZALKOTOB A R, et al. Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning [J]. Applied Mathematics and Computation, 2019(350): 105-132.
- [5] CAUNHYEA 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, 2015(90): 161-176.
- [6] 狄卫民, 张鹏阁, 杜慧莉. 考虑道路状况的应急配发站启用以及配送优化问题[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 12-17.
DI Weimin, ZHANG Pengge, DU Huili. Emergency dispatching station activation and distribution optimization problem considering road conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 12-17.
- [7] 陈丰, 丁文龙, 叶一凡, 等. 公共卫生事件暴发初期的医疗物资调度优化[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 65-72.
CHEN Feng, DING Wenlong, YE Yipeng, et al. Optimization of medical supplies scheduling in the early stage of public health incidents[J]. Journal of China Highway, 2020, 33(11): 65-72.
- [8] EKICI A L I, KESKINOC AK, PINAR S, et al. Modeling influenza pandemic and planning food distribution [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2013, 16(1): 11-27.
- [9] GARZA R J A, VILLARREAL B, KUMAV, et al. A Lean-TOC approach for improving Emergency Medical Services (EMS) transport and logistics operations [J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2019, 22(3): 253-272.
- [10] 赵建友, 韩万里, 郑文捷, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资配送[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 168-177.
ZHAO Jianyou, HAN Wanli, ZHENG Wenjie, et al. Urban emergency medical supplies distribution under major public health emergencies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 168-177.
- [11] 胡晓伟, 宋浪, 杨滨毓, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资优化调度研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 55-64.
HU Xiaowei, SONG Lang, YANG Binyu, et al. Research on the optimal dispatch of urban emergency medical supplies under major public health emergencies [J]. Journal of China Highway, 2020, 33(11): 55-64.
- [12] 胡可昊, 李涛. 考虑公平的铁路应急物资调度优化研究[J]. 铁道货运, 2020, 38(7): 27-32.
HU Kehao, LI Tao. Study on optimization of railway emergency material dispatching considering fairness [J]. Railway Freight, 2020, 38(7): 27-32.
- [13] LUSHU L, LAI K K. A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem [J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(1): 43-57.
- [14] 武汉市统计局, 国家统计局武汉调查队. 武汉市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

(责任编辑: 张伟丽)