

突发公共卫生事件背景下多种类应急物资配送 路径优化研究

霍良安^{1,2}, 陈楠¹

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 智慧应急管理学院, 上海 200093)

摘要: 为了保障针对性检测以及治疗措施和传染病防控工作的顺利开展, 并制定科学合理的应急医疗物资配送策略, 构建了以最大化满意度和最早配送服务结束时间为目标的多中心多物资车辆路径优化模型。首先, 在传染病扩散 SQEIR 模型的基础上预测医疗物资需求; 其次, 针对多样化的应急医疗物资使用情景, 设计两种函数来评估不同类物资的配送满意度; 最后, 运用改进的樽海鞘算法对模型进行求解, 并与传统 NSGA-II 算法的结果进行了对比分析。模拟实验结果显示, 所提出的模型和改进算法能够更高效地解决突发公共卫生事件下的应急医疗物资配送问题, 且改进算法在全局搜索性能方面呈现出更为优越的特点。

关键词: 突发公共卫生事件; 多种类物资; 路径规划; 樽海鞘算法

中图分类号: U 116.2 文献标志码: A

Optimization of multi-type emergency materials distribution routes under the background of public health emergencies

HUO Liang'an^{1,2}, CHEN Nan¹

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To guarantee the smooth implementation of targeted testing and treatment measures and infectious disease prevention and control, and to also formulate a scientific and reasonable distribution strategy for emergency medical supplies, a multi-center, multi-material vehicle path optimization model was constructed. Its primary objective was to maximize satisfaction and the earliest delivery service end time. First, the demand for medical supplies was predicted based on the SQEIR model for spreading infectious diseases. Second, two functions were designed to evaluate the satisfaction of different classes

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72174121); 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位计划; 2024 年度上海市软科学研究项目 (22692112600)

第一作者: 霍良安 (1981-), 男, 教授. 研究方向: 应急管理. E-mail: sjtuhuo@163.com

引文格式: 霍良安, 陈楠. 突发公共卫生事件背景下多种类应急物资配送路径优化研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(1): 108-118.

Citation: HUO Liang'an, CHEN Nan. Optimization of multi-type emergency materials distribution routes under the background of public health emergencies[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(1): 108-118.

of material distribution for diverse emergency medical material use scenarios. Finally, the improved salp swarm algorithm was designed to solve the model, and the results were compared and analyzed with those of the traditional NSGA-II algorithm. The simulation results demonstrate that the proposed model and the improved algorithm can efficiently solve the emergency medical material distribution problem under public health emergencies, and the improved algorithm presents superior characteristics in terms of global search performance.

Keywords: public health emergency; multiple types of materials; path planning; salp swarm algorithm

突发公共卫生事件在世界各地时有发生,威胁着人类的生命与财产安全。快速采取应急响应措施,并保障应急物资的配送,对工作顺利开展起着决定性的影响作用^[1]。面对突发公共卫生事件暴发后应急物资配送难的问题,合理预测疫区各物资需求量,充分利用配送能力,尽可能满足应急需求,提出高效合理的配送方案,均是当前的研究重点。

目前,国内外研究人员对应急救援物资配送问题进行了大量研究。Büyükahtakin等^[2]提出了一种新的流行病-物流优化模型,考虑了疾病传播率的地理差异,感染者在不同地区的迁移,以及由于治疗中心能力有限而导致的不同治疗率。Huang等^[3]讨论了灾区需求和道路出行时间缺乏历史数据情况下的应急救援物资配送问题,基于不确定性理论,建立了应急物流配送路径模型。赵建有等^[4]将需求紧迫度作为配送影响因素,构建了优先配送高紧迫度需求点和总费用最小为目标的配送模型,优化了医疗物资的配送路径。上述研究仅能解决由单一配送中心向多个需求点运送物资的配送网络,而突发公共卫生事件影响范围广泛,涉及多个区域,实际应急物资救援往往需要考虑有多个配送中心的情况。王付宇等^[5]研究了地震情境下伤员应急救援的两阶段路径优化模型,解决了救援区域划分和救援需求预测等问题。Zhong等^[6]提出了一种风险规避方法,同时考虑了救灾设施选址和车辆路径问题中需求变化的可靠性和不可靠性,构建了以等待时间和系统成本为目标的风险规避优化模型。虽然这些研究考虑了多个配送中心向需求点配送物资的物流网络,但仍局限于单种应急救援物资的配送研究。

对于多种应急物资的配送问题,应考虑不同物资的需求差异和配送时间要求等多种因素。冯春等^[7]将物资根据需求周期进行分类,建立了权

衡效率与公平目标的多周期多品类应急物资循环分批配送模型。Lee等^[8]研究了可重复利用资源和一次性资源的应急救援配送问题,并提出了一种启发式算法求解该问题。此外,很多研究者考虑了时间窗对车辆路径问题的影响。吕伟等^[9]提出了综合考虑软硬时间窗约束的应急物资车辆路径配送模型;Zhen等^[10]探究了具有时间窗和客户需求发布时间的多仓库多行程车辆路径问题;Zhang等^[11]研究了具有软时间窗的大规模取件和交付问题。针对复杂多样的车辆路径模型,一些研究者设计了不同的启发式优化算法。康斌等^[12]改进了基于非支配解排序的遗传算法求解多目标应急救援物资配送路径的优化模型;Liu等^[13]提出了一种基于差分进化的混合多元宇宙优化器算法(DE-IMOV),求解城市应急物资异构车辆配送路径问题;Vahdani等^[14]提出了两种基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)和多目标粒子群优化(MOPSO)的有效元启发式算法,求解多目标、多时段、多商品的应急物资配送模型。

上述研究主要考虑多种应急物资配送问题中物资物理特性上的差异,但实际的应急救援物资配送决策中,不同物资在需求量和 service 时间满意度等方面也具有差异。为此,本文在已有工作的基础上,考虑治疗和检测两项应急响应工作的满意度,探究突发公共卫生事件发生后检测物资、治疗物资和医务人员3种物资的配送决策,并构建以最大化满意度和最早配送服务结束时间为目标的多中心多物资车辆路径优化模型,并针对模型特点设计改进樽海鞘算法进行求解。

1 问题描述与分析

1.1 疫区传染病状态模型

根据疾病传播规律和流行期间的检测行为,

本文构建了具有脉冲检测的SQEIR舱室模型^[15]，其传播流程如图1所示，箭头所指可以清楚地显示出各类人群的流动情况。该模型将感染区域内人群划分为6种类别，分别是：易感者(S)，即未感染疾病的个体；隔离易感者(SQ)，即与外界隔离的易感个体；潜伏者(E)，即携带病毒但未表现出感染症状，具有感染性的个体；隔离潜伏者(EQ)，即与外界隔离的潜伏个体；感染者(I)，即表现出感染症状且具有感染性的个体；治愈者(R)，即感染后被治愈，不携带病毒且具有免疫能力的个体。

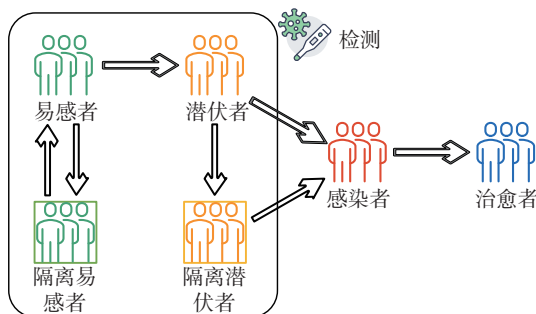


图1 具有脉冲检测的SQEIR舱室模型

Fig.1 SQEIR cabin model incorporating pulse detection

当易感者接触感染者或潜伏者后以 β 的概率感染病毒变为潜伏者；潜伏者以 γ 的概率自然转变为感染者，或通过检测确诊后归入感染者中进行治疗。考虑到疾病流行期间未表现出感染症状的个体会采取隔离等防控措施^[16]，因此，易感者和潜伏者均以 α 的概率转化为隔离易感者和隔离潜伏者。其中：隔离易感者以 ω 的概率解除隔离转变为易感者，隔离潜伏者以 ε 的概率出现感染症状转变为感染者，或通过检测确诊后归入感染者中进行治疗；感染者接受治疗后以概率 μ 转变为治愈者。在以上假设条件下，同时考虑脉冲检测因素：针对区域内所有易感状态和潜伏状态的个体周期性开展检测，以排查疾病传播中的潜伏个体，潜伏者和隔离潜伏者检测后以一定概率暴露，转变为感染者^[17]。

基于以上假设，任意感染区域 i 在任意时刻 t 的传染病扩散行为可以描述为以下常微分方程组，参数和变量说明见表1。

$$\frac{dP_{S,i}}{dt} = -\beta \frac{P_{S,i}(t)[P_{I,i}(t) + P_{E,i}(t)]}{N_i} - \alpha P_{S,i}(t) + \omega P_{SQ,i}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dP_{E,i}}{dt} = \beta \frac{P_{S,i}(t)[P_{I,i}(t) + P_{E,i}(t)]}{N_i} - (\alpha + \gamma) P_{E,i}(t) \quad (2)$$

表1 改进的SQEIR模型参数与变量说明

Tab.1 Improved SQEIR model parameters and variable descriptions

符号	含义
i	区域编号
β	疾病传播系数
γ	潜伏者变为感染者的转换率
α	易感者和潜伏者的隔离率
ω	隔离易感者解除隔离的概率
ε	隔离潜伏者出现感染症状的概率
μ	感染者的治愈率
θ	潜伏状态个体检测后确诊为感染者的概率
N_i	区域 i 的总人数
$P_{S,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的易感者人数
$P_{E,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的潜伏者人数
$P_{SQ,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的隔离易感者人数
$P_{EQ,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的隔离潜伏者人数
$P_{I,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的感染者人数
$P_{R,i}(t)$	疫区 i 在时刻 t 的治愈者人数

$$\frac{dP_{SQ,i}}{dt} = \alpha P_{S,i}(t) - \omega P_{SQ,i}(t) \quad (3)$$

$$\frac{dP_{EQ,i}}{dt} = \alpha P_{E,i}(t) - \varepsilon P_{EQ,i}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dP_{I,i}}{dt} = \gamma P_{E,i}(t) + \varepsilon P_{EQ,i}(t) - \mu P_{I,i}(t) \quad (5)$$

$$\frac{dP_{R,i}}{dt} = \mu P_{I,i}(t) \quad (6)$$

$$P_{E,i}(t^+) = (1 - \theta) P_{E,i}(t) \quad (7)$$

$$P_{EQ,i}(t^+) = (1 - \theta) P_{EQ,i}(t) \quad (8)$$

$$P_{I,i}(t^+) = P_{I,i}(t) + \theta P_{E,i}(t) + \theta P_{EQ,i}(t) \quad (9)$$

式中： λ 表示趋向于0的极小正值； $P_{E,i}(t^+) = \lim_{\lambda \rightarrow 0^+} P_{E,i}(t + \lambda)$ ； $P_{EQ,i}(t^+) = \lim_{\lambda \rightarrow 0^+} P_{EQ,i}(t + \lambda)$ ； $P_{I,i}(t^+) = \lim_{\lambda \rightarrow 0^+} P_{I,i}(t + \lambda)$ 。式(1)右项分别表示易感者接触潜伏者或感染者而被感染的人数变化、易感者进行隔离的人数变化以及隔离易感者解除隔离的人数变化；式(2)右项第二式表示潜伏者进行隔离以及转变成感染者的人数变化；式(4)右项第二式表示隔离潜伏者出现感染症状转变成感染者的人数变化；式(5)右项第三式表示感染者治疗后的康复人数变化；式(7)、式(8)和式(9)的右项分别表示经过一次脉冲检测，潜伏者、隔离潜伏者和感染者

人数的变化情况, $\theta P_{E,i}(t)$ 、 $\theta P_{EQ,i}(t)$ 为一次脉冲检测确诊的潜伏者和隔离潜伏者数量。对于任意疫区*i*,当给定初始值 $P_{S,i}(0)$ 、 $P_{E,i}(0)$ 、 $P_{I,i}(0)$ 、 $P_{R,i}(0)$ 、 $P_{SQ,i}(0)$ 、 $P_{EQ,i}(0)$ 等相关参数,便可以由式(1)~(9)分析该区域中传染病的扩散行为,从而预测该感染区域的各类人群数据。

1.2 配送满意度函数设计

公共卫生事件发生后,在以人道主义为本的应急救援活动中,配送满意度是评价救援行动效率的重要指标之一^[18-19]。根据所配送应急物资的特征,考虑到医务人员的到达时间与疫区检测及治疗行为能否顺利进行息息相关,从检测开始时间满意度和治疗物资送达时间满意度两方面衡量应急物资配送的整体满意度。

为方便后续满意度函数的表达,首先给出相关参数及变量定义如表2所示。

表2 满意度函数相关变量符号说明

Tab.2 Variable descriptions related to the satisfaction function

符号	含义
$E_{m,i}$	疫区 <i>i</i> 检测满意度
$E_{n,i}$	疫区 <i>i</i> 治疗满意度
$T_{r,i}$	疫区 <i>i</i> 检测物资和治疗物资送达时间
$T_{p,i}$	疫区 <i>i</i> 医务人员到达时间
$T_{M,i}$	疫区 <i>i</i> 预期开始检测时间
$T_{N,i}$	疫区 <i>i</i> 治疗物资安全库存时间
$T_{m,i}$	疫区 <i>i</i> 实际检测开始时间, $T_{m,i} = \max[T_{r,i}, T_{p,i}]$
$\omega_{m,i}$	疫区 <i>i</i> 潜伏者人数占所有潜伏者人数比例
$\omega_{n,i}$	疫区 <i>i</i> 受治疗患者人数占总患者数比例

a. 物资分类及动态需求预测。

公共卫生事件发生后,短时间内疫区信息匮乏,各类应急医疗物资的需求变得不确定。与此同时,各项应急响应工作的开展迫在眉睫,对物资的需求极为迫切。为此,在上述通过疾病扩散规律对疫区感染情况进行分析的基础上,对应急医疗物资的需求进行动态预测,从而使配送任务决策满足时变需求。

为减少疾病的传播风险,加快患者恢复,分别对不同人群进行检测和治疗,从而甄别人群中的潜伏状态个体以及治疗感染患者。这两种疾病防控行为都在疫区内的定点医院进行,且需要大量的应急医疗物资支撑。其中,检测物资用于易

感状态个体和潜伏状态个体,治疗物资用于感染者的住院治疗。

尽管检测和治疗物资能及时送达需求点,但是缺乏医务人员,或物资无法及时使用,则不能按时开展检测,并尽快治疗患者。因此,在疫情救援过程中,将医务人员考虑成应急资源的一种,医务人员尽快到达需求点开展工作是应急救援的重中之重^[8]。综上,本文将应急医疗物资总共分为3类:检测物资(*m*)、治疗物资(*n*)和医务人员(*p*),通过传染病扩散模型动态预测疫区各物资需求量^[20]。

为甄别隐藏在易感人群中的潜伏个体,针对区域内所有易感个体和潜伏个体进行检测,且检测物资的消耗是一次性的。因此,检测物资需求量仅由检测时刻疫区内易感个体和潜伏个体数量确定,与检测周期间隔时间无关。由此,预测*t*时刻疫区*i*检测物资需求量为

$$D_{m,i}(t) = \varphi_1 \cdot [P_{S,i}(t) + P_{E,i}(t) + P_{SQ,i}(t) + P_{EQ,i}(t)] \quad (10)$$

式中, φ_1 为一次脉冲检测的人均消耗单位检测物资量。

治疗物资的使用主要为感染患者住院治疗,是一个持续性消耗的过程,因此,治疗物资需求量由疫区内感染者人数和使用时间确定^[21]。预测*t*时刻疫区*i*治疗物资需求量为

$$D_{n,i}(t) = \varphi_2 P_{I,i}(t) T_n + z_{1-\varepsilon} \sigma_i(t) \sqrt{T_n} \quad (11)$$

式中: φ_2 为治疗物资的人均单位需求量; T_n 为治疗物资使用时间; ε 为置信水平,也叫缺货率; $z_{1-\varepsilon}$ 为服务水平为 $1-\varepsilon$ 时对应的安全系数; $\sigma_i(t)$ 为*t*时刻第*i*个疫区治疗患者人数的时变需求标准差,可通过以下公式计算得到:

$$\sigma_i(t) = \frac{\sqrt{\sum_{l=1}^{N_1} [P_{I,i}^l(t) - \bar{P}_{I,i}(t)]^2}}{N_1 - 1} \quad (12)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, N_1$,表示感染者人数; $\bar{P}_{I,i}(t)$ 为感染者人数均值。

检测和治疗行为都在疫区内的定点医院开展,均需要医务人员的参与,因此,疫区*i*所需医务人员数量由检测需求量和治疗需求量共同决定,其计算公式如下:

$$D_{p,i}(t) = \varphi_3 [P_{S,i}(t) + P_{E,i}(t) + P_{SQ,i}(t) + P_{EQ,i}(t)] + \varphi_4 P_{I,i}(t) \quad (13)$$

式中, φ_3 、 φ_4 分别为检测和治疗的人均需要医务

人员量。

b. 检测满意度。

检测服务要求检测物资和医务人员同时可用，因此，疫区检测开始时间由检测物资送达时间和医务人员到达时间共同决定，即两种物资全部到达需求点的时间，决定了服务开始时间。疫区*i*实际检测开始时间 $T_{m,i}$ 为检测物资送达时间和医务人员到达时间两者的较大值 $\max[T_{r,i}, T_{p,i}]$ 。疫区一旦服务开始，就有一个给定的服务持续时间。

突发公共卫生事件中的检测行为是离散的、非连续的过程，每次检测行为可以看成一次脉冲检测。一旦当次检测需求未被满足，所造成的损失无法通过后续的配送进行弥补。因此，检测开始时间窗约束为硬时间窗约束，其满意度函数为一个阶跃函数，如图2所示。

当实际检测开始时间早于预期检测开始时间时，检测行为顺利开始，满意度为1；实际检测开始时间大于预期检测开始时间时，则表示配送延误，检测行为未能顺利开始，满意度降为0。根据上述描述，给出检测满意度函数定义如下：

$$E_{m,i} = \begin{cases} 1, & \max[T_{r,i}, T_{p,i}] < T_{M,i} \\ 0, & \max[T_{r,i}, T_{p,i}] \geq T_{M,i} \end{cases} \quad (14)$$

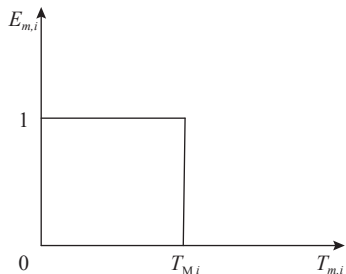


图2 检测开始时间满意度函数图

Fig.2 Function diagram of satisfaction with the start time of the detection

式(14)给出了疫区*i*的检测满意度，其中 $\max[T_{r,i}, T_{p,i}]$ 表示检测物资送达时间和医务人员到达时间的较大值，即实际检测开始时间。

c. 治疗满意度。

由于治疗物资的消耗是连续的、时变的，其送达时间满意度是抽象的，因此，本文建立了基于库存的时间满意度函数。治疗物资配送时间窗约束为软时间窗约束，如图3所示。时间窗下限和上限分别为配送服务开始时间($t=0$)和医务人员到达时间。

患者治疗刻不容缓，应急物资配送通常要求

越快越好，时间窗约束中的最早开始服务时间可以直接设定为配送服务开始时间。在医务人员到达前，治疗活动未全面开始，治疗物资消耗缓慢，库存充足，因此，假设治疗物资在医务人员到达前送达满意度都为1。医务人员到达后治疗进程加快，治疗物资消耗迅速，此时若治疗物资还未送达可能会影响治疗进度，满意度开始下降。若治疗物资送达时间晚于需求点安全库存时间，表示治疗物资配送过迟，严重影响了治疗，满意度降为0。需求点治疗满意度分段函数如下：

$$E_{n,i} = \begin{cases} 1, & T_{r,i} \leq T_{p,i} \\ \frac{T_{r,i} - T_{N,i}}{T_{r,i} - T_{p,i}}, & T_{p,i} < T_{r,i} < T_{N,i} \\ 0, & T_{r,i} \geq T_{N,i} \end{cases} \quad (15)$$

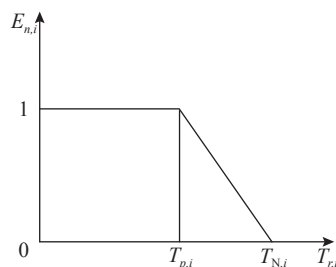


图3 治疗物资送达时间满意度函数图

Fig.3 Function diagram of satisfaction with the delivery time of treatment supplies

2 应急配送路径优化

突发公共卫生事件中的应急物资供应链网络通常由物资配送中心、医疗队、定点医院组成，如图4所示。物资配送中心为应急管理部门提前设定的物资集散地，接受各地(国家区域应急救援中心等)捐赠的救援物资并配送至各疫区的定点医院

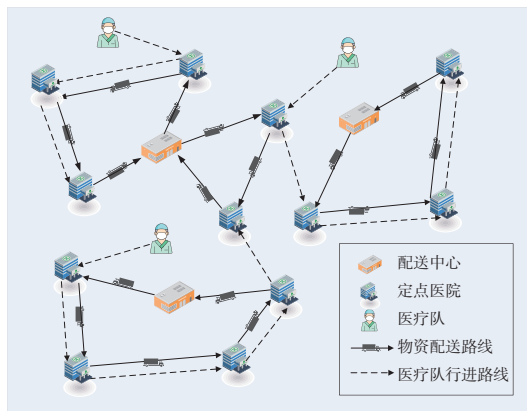


图4 配送路径示意图

Fig.4 Schematic diagram of distribution route

院, 以解决突发事件中应急物资供应难的问题。医疗队由各地统一派遣医务人员组成, 以缓解突发公共卫生事件暴发后疫区医务人员的不足。医疗队属于可调拨物资, 能服务多个疫区, 因此涉及跨区调度。定点医院为疾病暴发后开展检测和治疗服务的场所, 即各疫区应急物资需求点。

物资配送中心调集检测和治疗物资后, 根据各需求点差异合理规划配送路径, 将物资送至各定点医院; 各地医疗队确定所服务的定点医院, 按照预定的顺序陆续访问各定点医院, 以便进行一定量的治疗 and 检测服务。某个需求点服务终止后, 消耗了指定数量的检测和治疗物资, 医疗队前往下一个需求点。

本文构建的模型是一个带时间窗的多中心车辆路径规划问题(multi-depot vehicle routing problem with time windows, MDVRPTW), 决策者需要解决的问题是确定各配送中心和医疗队的服务范围, 将各种应急物资根据不同的时间窗约束, 沿不同的路线配送至各定点医院, 以支援它们的服务工作, 减少延误, 提高应急救援满意度水平。模型的相关参数和变量如表3所示。

表3 物资配送模型相关参数设置和变量说明

Tab.3 Parameter settings and variable descriptions of the material distribution model

符号	含义
H	定点医院集合, $h \in H, h = 1, 2, \dots, n_H$
K	物资配送中心集合, $k \in K, k = 1, 2, \dots, n_K$
G	医疗队集合, $g \in G, g = 1, 2, \dots, n_G$
V	可用车辆集合, $v \in V, v = 1, 2, \dots, n_V$
R	物资种类集合, $r \in R, r = m, n$
D_g	医疗队 g 的规模
$D_{r,h}$	定点医院 h 对应的物资 r 的供应量
$D_{p,h}$	定点医院 h 对应的医务人员 p 的供应量
Q	物资运输车辆的最大载重量
t_{ij}	节点 i 到 j 的车辆行驶时间
$t_{g,h}$	医疗队 g 在定点医院 h 的服务时间
x_{ij}^v	车辆 v 是否从节点 i 直接到节点 j 的0-1决策变量
y_h^v	定点医院 h 的物资是否由车辆 v 配送的0-1决策变量
z_h^k	定点医院 h 是否由配送中心 k 配送的0-1决策变量
w_{ij}^g	医疗队 g 是否从节点 i 直接到节点 j 的0-1决策变量
u_h^g	定点医院 h 是否由医疗队 g 服务的0-1决策变量

根据所研究的事件背景, 本文作出如下假设:

a. 通常认为选址是长期的战略性问题, 车辆路径优化是短期的操作性问题, 选址、路径这两个子问题不在同一个战略层面。因此, 本文假设配送中心位置已知, 不考虑配送中心的选址问题。

b. 定点医院为疫区检测和治疗的服务场所, 其物资需求量就是疫区物资需求量, 各定点医院的预期开始检测时间和治疗物资安全库存时间已知。

c. 检测物资和治疗物资可以混装, 医务人员组成医疗队单独行进, 定点医院需要的不同种类的应急物资相互不可替代。

所求解的问题描述为如下混合整数规划模型。

目标函数:

$$\max Z_1 = \sum_{h \in H} E_{m,h} \omega_{m,h} \quad (16)$$

$$\max Z_2 = \sum_{h \in H} E_{n,h} \omega_{n,h} \quad (17)$$

$$\min Z_3 = \max[T_{r,h}, T_{p,k}], \forall k \in K \quad (18)$$

约束条件:

$$\sum_{h \in H} D_{r,h} y_h^v \leq Q, \forall v \in V \quad (19)$$

$$D_g \geq D_{p,h}(t) u_h^g, \forall g \in G, h \in H \quad (20)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^v \geq 1, \forall v \in V \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} z_h^k = 1, \forall h \in H \quad (22)$$

$$\sum_{g \in G} u_h^g = 1, \forall h \in H \quad (23)$$

$$\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} x_{ij}^v = 0, \forall v \in V \quad (24)$$

$$\sum_{i \in H} x_{ij}^v = \sum_{j \in H} x_{ij}^v = 1, \forall v \in V \quad (25)$$

$$D_{r,h} = D_{r,h}(t), r = m \quad (26)$$

$$\Pr\{D_{r,h}(t) \geq D_{r,h}\} \geq 1 - \varepsilon, r = n \quad (27)$$

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{车辆}v\text{从节点}i\text{直接到节点}j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

$$y_h^v = \begin{cases} 1, & \text{定点医院}h\text{的物资由车辆}v\text{配送} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

$$z_h^k = \begin{cases} 1, & \text{定点医院}h\text{由配送中心}k\text{配送} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

$$w_{ij}^g = \begin{cases} 1, & \text{医疗队}g\text{从节点}i\text{直接到节点}j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

$$u_h^g = \begin{cases} 1, & \text{定点医院}h\text{由医疗队}g\text{服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式(16)为模型的检测满意度最大化目标函数,即各定点医院检测开始时间满意度加权和最大化;式(17)为模型的治疗满意度最大化目标函数,即各定点医院检测物资送达时间满意度加权和最大化;式(18)为模型的总配送服务结束时间最早目标函数;式(19)表示车辆配送时的运货量小于车辆的载重量;式(20)表示医疗队规模不小于当次所服务定点医院时的医务人员需求量;式(21)为子巡回消除约束;式(22)、(23)说明每个定点医院有且只有一辆车和一个医疗队服务,所需物资不能由多辆车拆分配送;式(24)限制任意两个配送中心之间不进行配送任务;式(25)表示在车辆完成配送工作后返回至出发的配送中心,构成闭环配送网络;式(26)表示按需配送检测物资,即定点医院该次配送检测物资量等于该时刻检测物资需求量;式(27)表示从被选择的配送中心运送至定点医院的治疗物资量能够以概率 ε 满足需求;式(28)~(32)为模型决策变量。

3 算法设计

樽海鞘算法(salp swarm algorithm, SSA)是Mirjalili等^[22]于2017年提出的一种新型智能优化算法。该算法模拟了樽海鞘链的群体行为,是一种较新颖的群智能优化算法。每次迭代中,领导者指导追随者,以一种链式行为,向食物移动。移动过程中,领导者进行全局探索,而追随者则充分进行局部探索,大大减少了陷入局部最优的情况。SSA自提出以来,被广泛应用到连续优化问题的求解中,并取得了较好的效果。为进一步扩大SSA的应用领域,结合NSGA-II的流程框架,设计改进樽海鞘算法,以求解带时间窗的多中心多物资配送路径问题^[23-24]。

3.1 种群初始化

樽海鞘算法中每个樽海鞘表示模型的一个解,本文采用自然数编码方式设计,每只樽海鞘由 $4 \times n_H$ 个随机排列的数组成,其4组长数列分别表示 n_H 个定点医院所属的物资配送中心的编号、定点医院的配送顺序、定点医院的服务医疗队编

号、医疗队到达定点医院的路线。以3个物资配送中心、4个医疗队、8个定点医院为例,其可行解的编码如图5所示。这种编码方式确保染色体长度固定不变且每条染色体均可以解码成一种可行的路径方案,有利于算法进行后续的更新操作及搜索操作,提高算法运行效率。

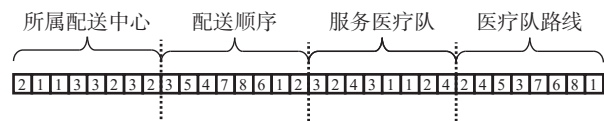


图5 编码方式

Fig.5 Encoding mode

随机生成 L 个上述组合数列作为初始种群,引入领导者-跟随者自适应调整策略,樽海鞘领导者的数目随迭代次数的增加自适应减少,跟随者数目随迭代次数自适应增加。算法在运行前期能够保持很强的全局搜索能力,同时兼顾局部搜索;而在运行后期,局部搜索逐渐增强,并兼顾全局搜索,从整体上提高了算法的收敛精度。每代樽海鞘中领导者数量为 ζL ,跟随者数量为 $(1-\zeta)L$ 。改进后的领导者-跟随者数量计算公式为^[22]

$$\zeta = b \left(\tan \left(-\frac{\pi \kappa}{4\kappa_{\max}} + \frac{\pi}{4} \right) - \eta \Omega \right) \quad (33)$$

式中: κ 为当前迭代次数; κ_{\max} 为最大迭代次数; b 为控制领导者-跟随者数量的比例系数,为避免迭代前期的樽海鞘领导者或迭代后期的樽海鞘跟随者比例过高,以及全局和局部搜索失衡导致寻优性能降低、易陷入局部极值的现象,本文取值为0.75; η 为扰动偏离因子,取0.2; Ω 为随机数。 ζ 的值随着算法迭代次数的增加呈非线性递减趋势,于是领导者数量逐渐减少,跟随者数量逐渐增加。动态改变种群中领导者与追随者的数量比例,可以更好地平衡算法的全局开发和局部探索能力,提高算法的性能。

3.2 樽海鞘的更新

选取领导者群体中适应度前三的樽海鞘个体作为备选食物源,分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 。对剩余领导者进行引导操作,并针对选址路径问题的编码方式,设计了如式(34)所示的搜索机制。生成一个 $[0,1]$ 的随机数 Ω ,然后根据 Ω 不同的取值范围将当前第 κ 代中除去3个候选食物源的其他领导者个体与 F_1 、 F_2 、 F_3 中的某一个个体进行LOX(linear order crossover)操作。图6给出了一个 $F_1(\kappa)$ 和 $F_i(\kappa)$ 进行LOX操作的具体实例。

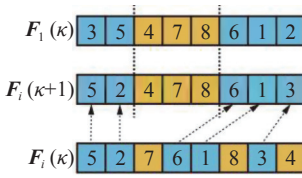


图6 领导者位置更新

Fig.6 Leader position update

$$F_i(k+1) = \begin{cases} F_i(k) \otimes F_1(k), & \Omega < 1/3 \\ F_i(k) \otimes F_2(k), & 1/3 < \Omega < 2/3 \\ F_i(k) \otimes F_3(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (34)$$

为有效改善算法的局部搜索能力, 避免算法的早熟现象, 引入变异操作对追随者位置进行更新。采用前插法插入变异算子, 其具体操作思路是随机选择两个不同的基因位置点 pos1 和 pos2, 将 pos2 位置上的基因插入到 pos1 前面, pos1 以及 pos1 和 pos2 之间的基因往后顺移一位, 插入变异操作如图7所示。

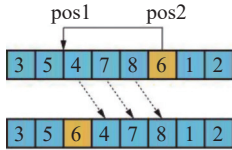


图7 追随者位置更新

Fig.7 Follower location update

为避免算法陷入局部最优, 引入学习机制对食物源位置进行扰动, 以使其进行更充分有效的全局搜索。方法如下: 在候选食物源每段染色体内随机选择两个位置; 将两个位置之间的基因段复制给新食物源; 剩余左侧基因段打乱顺序复制给新食物源左侧, 右侧基因段打乱顺序复制给右侧。具体操作过程如图8所示。

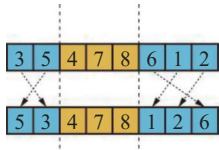


图8 食物源位置更新

Fig.8 Food source location update

3.3 算法实现步骤

改进后的樽海鞘算法流程如图9所示, 具体步骤描述如下:

- a. 初始化算法参数, 包括种群规模 L 、算法最大迭代次数 κ_{\max} 等;
- b. 种群初始化, 随机生成 L 个樽海鞘个体作为初始可行解, 并令初始迭代次数 $\kappa = 1$;
- c. 计算樽海鞘每个个体的适应度值, 将适应度

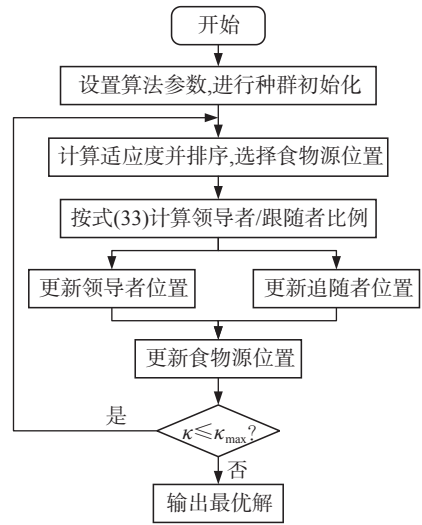


图9 算法流程图

Fig.9 Algorithm flow chart

值最小的3个樽海鞘作为食物源的位置;

- d. 分配领导者-追随者种群, 根据式(33)更新 ζ , 选择适应度排在前 ζL 的樽海鞘个体作为领导者, 剩余个体为追随者;
- e. 领导者位置更新;
- f. 追随者位置更新;
- g. 食物源位置更新;
- h. 判断迭代次数是否达到最大迭代次数, 如果达到, 算法结束; 如果未达到, 则返回c, 循环操作直至达到终止条件。

4 算例分析

4.1 算例介绍与参数设置

为验证本文模型在实际突发公共卫生事件中的应急救援效果, 以2022年上半年上海市 COVID-19 疫情的相关数据为基础进行算例分析^[9]。

疫情期间各地设立定点医院诊治患者, 并以定点医院以及周边小区、街道为疾病检测地点, 假设定点医院为疫区统一进行治疗与检测的地点。选取4个应急物资配送中心(编号为 $K_1 \sim K_4$), 5支医疗队(编号为 $G_1 \sim G_5$)以及25个定点医院(编号为 $H_1 \sim H_{25}$)。参考公共卫生科学数据中心及文献中提供的资料, 对疫情传播的相关参数、疫区人口结构等进行了统一设置, 通过百度地图获取配送中心、医疗队初始位置与定点医院的坐标和距离。表4~6分别为物资配送中心、医疗队、定点医院的相关数据, 由于篇幅原因, 只列出部分参数。

表 4 配送中心位置

Tab.4 Distribution center location

编号	坐标
K_1	(121.3855, 31.2698)
K_2	(121.4386, 30.9641)
K_3	(121.3334, 31.1426)
K_4	(121.3058, 31.3534)

表 5 医疗队位置及规模

Tab.5 Location and size of medical team

编号	坐标	规模
G_1	(121.5388, 31.2749)	30
G_2	(121.3580, 31.1432)	50
G_3	(121.4798, 30.9231)	50
G_4	(121.2252, 31.2749)	20
G_5	(121.5746, 31.2547)	30

表 6 定点医院需求量及时间窗

Tab.6 Demand and time window of designated hospitals

编号	检测物资需求量	治疗物资需求量	医务人员需求量	预期开始检测时间	安全库存时间
H_1	131	67	13	257	310
H_2	222	239	35	290	350
H_3	139	49	12	240	317
H_4	195	138	24	329	421
H_5	248	75	20	145	195
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
H_{20}	366	131	31	108	128
H_{21}	164	15	10	220	280
H_{22}	381	78	27	168	250
H_{23}	254	8	13	180	220
H_{24}	229	8	12	189	210
H_{25}	253	9	22	80	88

4.2 结果分析

采用上述提出的改进樽海鞘算法对模型进行求解，算法基本参数设置为：初始种群大小 $L = 100$ ，最大迭代次数 500 次。迭代结束后，所有解收敛到帕累托 (Pareto) 前沿面上，得到 Pareto 最优解集如图 10 所示。图 10 给出了迭代后种群的三维 Pareto 前沿解分布图。该 Pareto 解集中的每个点均表示经过迭代后所得的满足 Pareto 最优的一种物资配送方案。图 11 给出了以检测满意度和治疗满意度为目标的 Pareto 解分布

情况，可以看出两种满意度之间存在明显的悖反现象。这是因为检测满意度和治疗满意度都受到物资送达时间和医务人员到达时间的共同影响，而两种满意度对于各种物资的送达时间需求具有差异性。当医务人员到达时间更满足检测或治疗行为的需求时，将会导致另一行为的相关满意度下降。因此，不存在一个解在所有目标上比其他的解更优，通过 Pareto 前沿面的分析，救援决策者可根据疫情具体情况对决策目标的偏好进行选择。

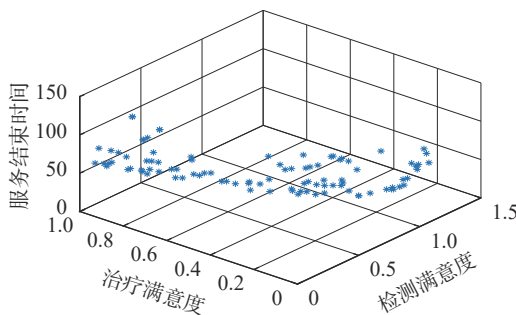


图 10 三维 Pareto 前沿解示意图

Fig.10 Schematic diagram of 3-dimensional Pareto frontier solution

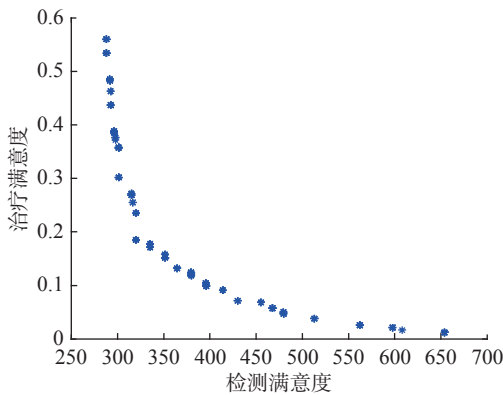


图 11 满意度前沿解示意图

Fig.11 Schematic diagram of satisfaction frontier solution

选取一组 Pareto 解，分析不同种类物资到达时间之间的交互影响，其具体配送路径如表 7 所示，各定点医院物资送达时间与医务人员到达时间如图 12 所示。对比物资配送路线与医疗队行进路线，发现各定点医院之间的连接存在高度重合，如 $8 \rightarrow 3 \rightarrow 10$ 、 $15 \rightarrow 5 \rightarrow 17$ 等路段，且各定点医院在两种车辆路线的配送顺序上大致相同。通过对各种类物资配送时间的分析可以看出，各定点医院物资送达时间与医务人员到达时间高度耦合，说明检测和治疗物资送达时间和医务人员到达时间之间存在协同关系。这是因为检测和治疗行为对物资和医务人员同时都有需求，且检测物

表 7 物资配送路径

Tab.7 Distribution route

物资配送路线	医疗队路线	目标值
$K_1 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 6 \rightarrow K_1$	$G_1 \rightarrow 19 \rightarrow 21 \rightarrow 20 \rightarrow 6 \rightarrow 16$	$Z_1 = 1.053 1$ $Z_2 = 0.402 1$ $Z_3 = 100.912 4$
$K_1 \rightarrow 21 \rightarrow 16 \rightarrow 4 \rightarrow K_1$	$G_2 \rightarrow 12 \rightarrow 24 \rightarrow 18 \rightarrow 22 \rightarrow 4$	
$K_2 \rightarrow 15 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow K_2$	$G_3 \rightarrow 25 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 10 \rightarrow 2$	
$K_2 \rightarrow 12 \rightarrow 18 \rightarrow 22 \rightarrow K_2$	$G_4 \rightarrow 11 \rightarrow 15 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow 14$	
$K_3 \rightarrow 25 \rightarrow 1 \rightarrow 13 \rightarrow 2 \rightarrow K_3$	$G_5 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow 23 \rightarrow 13 \rightarrow 7$	
$K_3 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 10 \rightarrow K_3$		
$K_4 \rightarrow 9 \rightarrow 24 \rightarrow 7 \rightarrow K_4$		
$K_4 \rightarrow 11 \rightarrow 23 \rightarrow 14 \rightarrow K_4$		

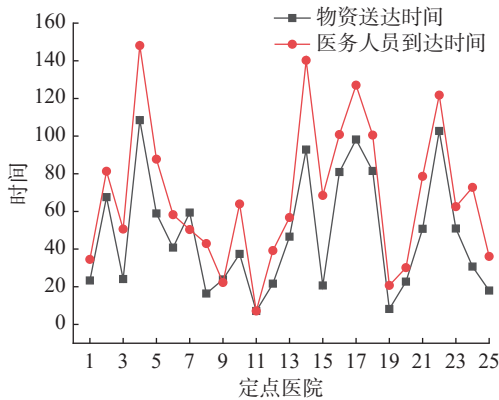


图 12 各定点医院物资到达时间

Fig.12 Arrival time of supplies to designated hospitals

资和医务人员无论谁先到达需求点都会进行等待, 造成时间浪费, 检测开始时间窗和治疗物资送达时间窗都要求物资与医务人员到达需求点的时间差值越小越好。

为了保证算法运行的稳定性和有效性, 本研究将改进的樽海鞘算法与一般樽海鞘算法和 NSGA-II 算法进行了比较, 得出 3 种算法的适应度收敛曲线, 如图 13 所示。另外, 将 3 种算法在不同的迭代次数下独立运行 20 次, 并计算平均运行时间, 比较各算法的运行效率, 结果如表 8 所示。

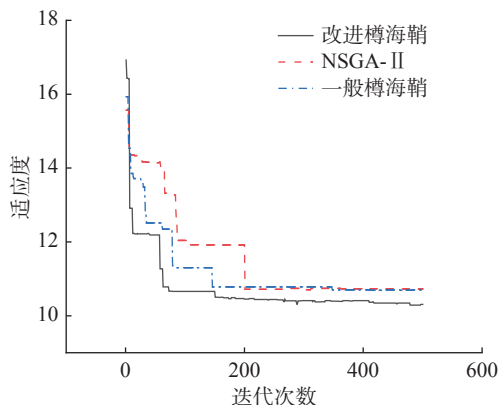


图 13 各算法的适应度收敛曲线

Fig.13 Fitness convergence curves of each algorithm

通过算法收敛曲线对比结果可以看出, 在本算法迭代过程中, 函数曲线在迭代初期波动较大, 随着迭代次数增大, 曲线趋于平缓。从图 13 中可看出, 本文所提算法适应度函数值最低, 可见本文提出的算法能更有效求解所提出的问题。在本算法迭代过程中, 从曲线倾斜程度可看出, 初期函数值变化幅度较大, 算法收敛效率较高。从表 8 可以看出, 改进樽海鞘算法在不同迭代次数下, 运行时间均最短, 表明本文算法在求解该类多目标车辆路径问题上具有较好的寻优效率以及全局搜索能力。

表 8 算法运行时间对比

Tab.8 Comparison of algorithm running time

迭代次数	NSGA-II	一般樽海鞘	改进樽海鞘
100	42.459	42.131	40.846
300	124.501	123.967	119.457
500	211.796	205.237	198.934

5 结 论

本文研究突发公共卫生事件背景下的多种类应急物资配送问题, 根据事件暴发后应急医疗物资的用途分为检测和治疗两种不同的情景。考虑检测物资和治疗物资配送以及医务人员调动的交互影响, 界定了两种不同的满意度函数。在运用疾病扩散 SQEIR 模型预测各物资需求量的基础上, 建立了两种满意度最大化以及配送服务结束时间最小化的多中心多物资车辆路径优化模型, 同时改进了一种樽海鞘算法, 并使用算例分析进行了验证。仿真实验结果表明: 本文提出的模型和算法能够针对多个目标获得多配送中心多种类物资的有效配送方案, 不同种类物资配送之间存

在协同作用,改进算法在求解速度和求解精度上都具有良好的性能。

突发公共卫生事件中的应急医疗物资配送优化是复杂的动态性问题,冲突性、多目标和多阶段是应急配送路径模型研究中的关键要素。随着疾病的演化,配送任务必须动态调整以满足各阶段需求,且各阶段对于时间、成本、满意度等目标的权衡具有差异,未来将针对这一系列问题进行研究,逐步完善配送路径优化模型。

参考文献:

- [1] 江志斌,文静,耿娜,等.面向重大传染性疾病的应急资源管理研究综述[J].*工业工程*,2020,23(6):1-9.
- [2] BÜYÜKTAHTAKIN İ E, DES-BORDES E, KİBİŞ 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.
- [3] HUANG X X, SONG L Y. An emergency logistics distribution routing model for unexpected events[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 269(1): 223-239.
- [4] 赵建有,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.
- [5] 王付宇,叶春明,王涛,等.震后伤员救援车辆两阶段规划模型及算法研究[J].*管理科学学报*,2018,21(2):68-79.
- [6] 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.
- [7] 冯春,向阳,薛坤,等.多周期多品种应急物资配送多目标优化模型[J].*中国管理科学*,2017,25(4):124-132.
- [8] LEE K, LEI L, PINEDO M, et al. Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(23/24): 7071-7090.
- [9] 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.
- [10] ZHEN L, MA C L, WANG K, et al. Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 135: 101866.
- [11] ZHANG K, LI M, WANG J G, et al. A two-stage Learning-based method for large-scale on-demand pickup and delivery services with soft time windows[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 151: 104122.
- [12] 康斌,刘权,黄健,等.突发事件下多目标应急救援物资配送路径规划[J].*科学技术与工程*,2020,20(4):1521-1527.
- [13] LIU H S, SUN Y X, PAN N, et al. Study on the optimization of urban emergency supplies distribution paths for epidemic outbreaks[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 146: 105912.
- [14] VAHDANI B, VEYSMORADI D, SHEKARI N, et al. Multi-objective, multi-period location-routing model to distribute relief after earthquake by considering emergency roadway repair[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(3): 835-854.
- [15] 黄森忠,彭志行,靳祯.新型冠状病毒肺炎疫情控制策略研究:效率评估及建议[J].*中国科学:数学*,2020,50(6):885-898.
- [16] 丰利香,王德芬.具有隔离和不完全治疗的传染病模型的全局稳定性[J].*数学物理学报*,2021,41(4):1235-1248.
- [17] 都牧.数据驱动在疫情检测和医疗资源动态分配的联合决策方法[J].*中国管理科学*,2024,32(11):168-179.
- [18] 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.
- [19] 孙奇,马良.基于客户满意度的车辆路径问题的混合蝙蝠算法[J].*上海理工大学学报*,2019,41(2):160-166.
- [20] 于明亮,刘帅,浦东平.信息传播影响下基于进化蜂群算法的应急车辆路径优化设计[J].*上海理工大学学报*,2021,43(1):83-92.
- [21] 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.
- [22] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114: 163-191.
- [23] 万孟然,叶春明,董君,等.考虑备灾的双层规划应急资源调度选址——路径优化模型与算法[J].*计算机应用研究*,2021,38(10):2961-2967.
- [24] 宋晓鹏,韩印,姚佼.基于NSGA算法的公交车辆调度优化模型[J].*上海理工大学学报*,2014,36(4):357-361.

(编辑:丁红艺)