

文章编号:1671-1637(2020)03-0168-10

# 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资配送

赵建有<sup>1</sup>, 韩万里<sup>1</sup>, 郑文捷<sup>1</sup>, 赵 阳<sup>2</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了在发生重大突发公共卫生事件时提高城市医疗物资的应急救援效率,减少人员伤亡与经济损失,在分析重大突发公共卫生事件特点与应急物流特征的基础上,将需求紧迫度作为配送影响因素,提出以辖区人口、感染确诊及疑似病例、医疗物资需求点规模、医护人员数量和医疗物资缺口率为评价指标的医疗物资需求点需求紧迫度评价指标体系;针对医疗物资应急物流的特点,调整医疗物资配送时间窗参数,建立由车辆行驶成本、配送延误惩罚成本和无配送延误补贴费用组成的总配送费用函数,并考虑配送车辆载重、配送时间窗、医疗物资需求紧迫度等约束条件,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,优化了医疗物资的配送路径;依托SPSS、Yaahp和MATLAB软件平台,结合算例,利用层次分析法与遗传算法求解考虑与不考虑需求紧迫度的医疗物资应急物流配送路径优化模型。研究表明:重大突发公共卫生事件下,相对于不考虑需求紧迫度的配送路径,考虑需求紧迫度的最优配送路径不仅对需求紧迫度较高的医疗物资需求点进行优先配送,同时还使总配送费用减少了5.8%;需求紧迫度的引入能极大地改善调度的盲目性,基于配送车辆载重、配送时间窗、医疗物资需求紧迫度等约束条件所构建的双目标优化模型能够有效地提高应急救援效率和减少不必要的调度成本。

**关键词:**应急物流;重大突发公共卫生事件;医疗物资;需求紧迫度;遗传算法;配送路径

**中图分类号:**U121 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.016

## Distribution of emergency medical supplies in cities under major public health emergency

ZHAO Jian-you<sup>1</sup>, HAN Wan-li<sup>1</sup>, ZHENG Wen-jie<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>2</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To improve the emergency rescue efficiency of medical supplies and reduce the casualties and economic losses in cities under the major public health emergency, based on the characteristics analyses of major public health emergencies and emergency logistics, the demand urgency was taken as the influencing factor of distribution. The evaluation index system for medical supplies demand points was proposed with the evaluation indexes of population within jurisdictions, confirmed and suspected cases of infection, scale of medical supplies demand point, number of medical staff and gap rate of medical supplies. According to the characteristics of

收稿日期:2020-03-08

基金项目:国家自然科学基金项目(71971030);陕西省交通运输厅科研项目(18-27R);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102228114)

作者简介:赵建有(1963-),男,河南西峡人,长安大学教授,工学博士,从事物流工程与交通运输安全研究。

通讯作者:韩万里(1987-),男,河南项城人,长安大学工学博士研究生。

引用格式: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.

Citation: ZHAO Jian-you, HAN Wan-li, ZHENG Wen-jie, et al. Distribution of emergency medical supplies in cities under major public health emergency[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 168-177.

emergency logistics of medical supplies, the time window parameters of medical supplies distribution were adjusted. The total distribution cost function composed of driving cost, penalty cost of distribution delay and subsidy without distribution delay was established. Considering the constraints of vehicle load, distribution time window, and demand urgency of medical supplies, a dual objective of priority distribution for demand points with the minimum total distribution cost and high demand urgency was constructed to optimize the distribution path of medical supplies. Relying on the software platforms of SPSS, Yaahp and MATLAB, and combining with examples, the analytic hierarchy process and genetic algorithm were used to solve the optimization models of emergency logistics distribution path of medical supplies with and without the consideration of demand urgency. Research result shows that under the major public health emergency, the optimal distribution path considering the demand urgency not only gives priority to the medical supplies demand points with higher demand urgency, but also reduces the total distribution cost by 5.8%, comparing with the distribution path without the consideration of demand urgency. The introduction of demand urgency can greatly reduce the blindness of scheduling. The dual objective optimization model restrained by the conditions of vehicle load, distribution time window and demand urgency of medical supplies can effectively improve the emergency rescue efficiency and reduce unnecessary scheduling costs. 7 tabs, 3 figs, 34 refs.

**Key words:** emergency logistics; major public health emergency; medical supply; demand urgency; genetic algorithm; distribution path

**Author resumes:** ZHAO Jian-you(1963-), male, professor, PhD, jyzhao@chd.edu.cn; HAN Wan-li(1987-), male, doctoral student, 2017022011@chd.edu.cn.

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (71971030); Scientific Research Project of Department of Transport of Shaanxi Province (18-27R); Special Foundation for Basic Scientific Research of Central Colleges of China (300102228114)

## 0 引言

突发公共卫生事件是指突然发生,造成或可能造成社会公众健康严重损害的重大传染病疫情、群体性不明原因疾病、重大食物和职业中毒以及其他严重影响公众健康的事件<sup>[1]</sup>。根据突发公共卫生事件的性质、危害程度和涉及范围,将其分为特别重大、重大、较大和一般4个等级,其特点主要有成因多样性、分布差异性、传播广泛性、危害复杂性、治理综合性、新发事件不断产生、事件频繁发生、种类多样性以及危害严重等<sup>[2]</sup>。难以预测、无法预防的重大突发公共卫生事件夺取太多人的生命,致使国家经济遭受创伤,影响社会发展和进步。突发公共卫生事件对中国国民经济发展和社会安全构成了巨大威胁<sup>[3]</sup>。为了减少重大突发公共卫生事件对公众和经济的损害,恢复社会秩序,就需要为事发区供应大量的应急救援物资,尤其是医疗物资(口罩、测温仪、防护服和医疗酒精等相关防控物资),且在应急救援过程中采取正确、有力的措施对医疗物资进行快捷

准确的配送尤为重要。

目前,中国已经建立了较为科学合理的应急处理机制,力争在灾害发生后在最短时间、以最高效率把应急救援物资送到灾区,尽可能把灾害影响降到最低。物流系统为国民经济和社会安全提供了保障<sup>[4]</sup>,城市是物流活动的集聚地和重要组成部分,居民日常食物、药品等都需要经过城市物流系统配送才能保障其基本生活。在此次抗击 COVID-19 疫情过程中,中国许多城市在运输救援力量和医疗物资方面采取了一些应急、高效的特殊措施,如为避免疫情扩散,统筹考虑车站、应急储备点与医院,对人员和物资进行直达运输,实现了安全、快速和高效配送。然而,当应急运力调配,尤其是应急物资中转场站分拨转运处理能力及末端分发送能力不足时,会导致防控急需物资不能及时送达和分发送。相关研究表明,现代物流在应对突发公共卫生事件中起到了重要作用<sup>[5]</sup>,由于重大公共卫生事件的破坏性以及医疗资源的有限性与不确定性等会降低物流系统的运作效率,不仅会增加救援物资的配送时间、

运输成本及运输压力,还会增加公众的痛苦,给社会安全造成隐患<sup>[5]</sup>。各类应急救援物资能否保证迅速到位取决于能否及时准确选择最优的补给救援路线,在应急运输背景下选择路径相对复杂,既要考虑各医疗物资需求点的需求量和路径的连通性,还要考虑需求点的紧迫度、时间限制及车辆调配等关键问题。如何构建一个安全、高效的物流系统,使得在发生重大突发公共卫生事件下能为国民经济和社会生活提供安全保障是值得研究的问题。

随着全球化和社交网络化的纵深发展,突发公共卫生事件下的应急物流成为各国关注的热点与国际化合作的重要领域。在国外,应急物流概念由Carter<sup>[6]</sup>最早提出,随后 Bompadre 等<sup>[7]</sup>提出了救援物资供应问题的重要性与其所受到的关注度不相称的问题;Thomas<sup>[8]</sup>归纳了应急物流的生命周期理论,把应急物流的操作过程分为部署、维持和重新配置 3 个阶段;Shahparvari 等<sup>[9]</sup>提出在时间窗等信息不确定的条件下建立能够用于疏散人口的车辆调度模型;Moreno 等<sup>[10]</sup>研究了应急物流中考虑车辆重用的多时段选址运输问题,并利用启发式方法求解,验证了模型的有效性;Balcik<sup>[11]</sup>针对灾后应急物资的频繁持续救援,基于救援站点的选择问题建立优化模型,利用禁忌搜索理论和邻域搜索理论设计了求解算法,并验证了其有效性;Sakuraba 等<sup>[12]</sup>考虑地震后道路的修复,从路网通达性和救灾人员调度 2 个方面入手,构建最安全路径及合理救援时间数学模型,并利用启发式算法求解,验证了模型的有效性;Bruni 等<sup>[13]</sup>考虑了道路可靠性对救援的影响,构建了车辆救援路径优化模型;Bouchra 等<sup>[14]</sup>研究了有时间窗的车辆路径问题(静态和动态),并提出将遗传算法和变邻域搜索算法相结合来解决问题,该算法通过使用车队来降低运输成本和提高服务质量。2003 年国内学者开始从供应链系统安全转向区域物流系统安全研究<sup>[15]</sup>。王宗喜<sup>[16]</sup>提出了应急物流的 10 个研究方向,明确了应急物流的研究对象与范围,找出了应急物流的基本特点和规律,并研究了各类物流企业如何快速应对各类紧急状态;邹志云等<sup>[17]</sup>以行驶时间、拥挤程度、行驶困难度、运输安全性和运输组织便捷性为评价指标,运用灰色系统理论建立了应急物流的路径选择方法;程碧荣等<sup>[18]</sup>将应急物资配送过程中的车辆路径问题作为研究对象,考虑物资供应的不确定因素影响,构建了以供应不足和过多带来的损失、配送运输和启用成本最小化为优化目标的模型;Huang 等<sup>[19]</sup>分析了突发事件

下物流配送的特殊性,将应急物流定义为因突发事件使其参数无历史数据的物流配送路径问题,讨论了一个由专家给出受影响区域需求和道路行程时间无历史数据的应急物流配送路径,并基于不确定性理论建立了模型,设计了细胞遗传算法,最后采用实例说明了该模型和算法的有效性;也有一些学者<sup>[20-26]</sup>针对应急物资需求紧迫性研究其分类、分级和时间窗约束。

虽然国内外对于应急物流问题的相关研究很多,但重大突发公共卫生事件下的城市医疗物资应急物流研究相对较少,考虑医疗物资需求点需求紧迫度的研究几乎缺失。为此,本文重点研究重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资运输车辆路径问题,并将医疗物资需求点的需求紧迫度作为影响因素纳入应急物流车辆路径优化,建立医疗物资需求点需求紧迫度评价指标体系;针对医疗物资应急物流的特点,构建考虑需求紧迫度的应急物流车辆路径问题模型,并进行算法设计,最后进行算例分析与验证。

## 1 应急医疗物资需求紧迫度

鉴于重大突发公共卫生事件的特点,如果只根据医疗物资需求点的需求情况进行分配,可能会做出错误决定。在有限的应急物资条件下,配送能力受约束时,考虑应急物资的需求紧迫度十分有必要<sup>[27-28]</sup>。应根据需求紧迫度和专家的处置经验做出相对合理的医疗物资应急救援部署。

### 1.1 应急医疗物资需求紧迫度指标体系

考虑到目前中国重大突发公共卫生事件下医疗物资应急救援的相关研究不足,从一般应急救援积累经验来看,需求紧迫度指标主要包括受灾人员、基础设施及物资储备等情况<sup>[21]</sup>。参考《突发公共卫生事件报告管理信息系统》等相关应急文件,分析重大突发公共卫生事件下医疗物资需求点的相关属性,可以将影响医疗物资需求点需求紧迫度的因素分为感染情况、医疗基础设施情况和医疗物资储备情况。

(1)对于感染情况,人口密度越大,感染人数越多(包括确诊和疑似病例),则该区域医疗物资消耗必然增加,那么该区域医疗物资需求点需求的医疗物资也就越多,进而对医疗物资的需求程度也就越高。

(2)对于医疗基础设施情况,医疗物资需求点规模越大、医务人员越多,则说明医疗物资补给压力也



越大,则该医疗物资需求点对医疗物资的需求程度也越高。

(3)对于医疗物资储备情况,主要根据医疗物资需求点物资缺口率进行评价,某医疗物资需求点的物资缺口率越高,则说明该医疗物资需求点储备的应急医疗物资越少,因此,其对医疗物资的需求也就越高。

应急医疗物资需求点需求紧迫度评价指标体系见图1。

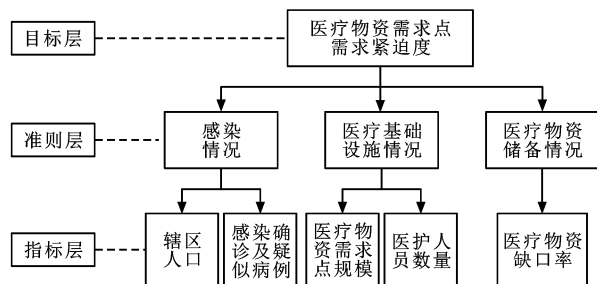


图1 应急医疗物资需求点需求紧迫度评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of demand urgency for emergency medical supplies demand point

## 1.2 基于层次分析法的应急医疗物资需求点需求紧迫度模型

由于在重大突发公共卫生事件后,大量信息错综复杂,信息的准确性和可信度需确认,直接利用原始数据计算时决策有可能出现错误<sup>[21]</sup>。此时,可以根据专家的处置经验进行辅助决策部署。而层次分析法是定性和定量分析相结合的决策方法,它具有操作简单、易行和包容性强等优点<sup>[29]</sup>,可为应急医疗物资的部署提供方向,因此,选择层次分析法对医疗物资需求点的需求紧迫度进行排序分析。

### 1.2.1 标准化处理

由于信息数据繁多,且计量单位不一,在计算医疗物资需求点需求紧迫度权重前,应标准化数据。为了便于理解和计算,采用0-1标准化处理。数据经标准化处理后在[0,1]区间内,转换公式为

$$x^* = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中: $x$ 为各医疗物资需求点需求情况的原始数据; $x^*$ 为原始数据的标准化值; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为 $x$ 的最大、最小值。

利用SPSS对医疗物资需求点的需求紧迫度评价指标原始数据标准化处理,结合处理后的指标数据,通过层次分析法获得的权重系数确定各医疗物资需求点的需求紧迫度,并将其作为紧迫度分级指标。

### 1.2.2 需求紧迫度模糊量化

数据标准化处理后,采用层次分析法对需求紧

迫度模糊量化,并用德尔菲法确定各评价指标的相对权重,建立判断矩阵;然后运用Yaahp软件分析数据,得出各评价指标对医疗物资需求点需求紧迫度的影响权重,再经加权运算,用一般加权和法得到医疗物资需求点的需求紧迫度得分,即

$$D_i = \sum_{l=1}^e W_l Z_{il} \quad (2)$$

式中: $D_i$ 为配送网络中医疗物资需求点 $i$  ( $i=0, 1, \dots, m$ )的需求紧迫度得分, $i=0$ 表示该点为物资配送中心, $m$ 为医疗物资需求点总数; $W_l$ 为评价指标 $l$  ( $l=1, 2, \dots, e$ )对需求紧迫度的权重, $e$ 为评价指标总数; $Z_{il}$ 为医疗物资需求点 $i$ 的评价指标 $l$ 的标准化值。

经标准化处理后的需求紧迫度对目标问题的影响程度未知,故需进行变换。即将各医疗物资需求点的需求紧迫度与配送网络中某定点医院的医疗物资需求紧迫度之比作为相对需求紧迫度。为防止所得值在[0,1]区间内,选用得分最小的医疗物资需求点为基准,即相对需求紧迫度为

$$\lambda_i = D_i / D_{\min} \quad (3)$$

式中: $\lambda_i$ 为配送网络中医疗物资需求点 $i$ 的相对需求紧迫度; $D_{\min}$ 为所有医疗物资需求点的需求紧迫度最小得分。

## 2 应急医疗物资物流车辆路径模型

### 2.1 应急医疗物资物流车辆路径

应急物流具有突发性、不确定性、紧迫性、弱经济性、需求后选择性、政府与社会资源共同参与性等特点<sup>[16]</sup>。应急医疗物资物流配送路径问题除具备一般应急物流配送路径的特点外,还需要考虑医疗物资的配送时间窗约束。通常设置2个时间节点(最早和最晚开始服务时间)作为相应的约束条件来确保优化目标能够满足需求。但应急医疗物资配送过程需要结合其特点与特殊性适当地调整配送时间窗,并适当合理地考虑其他影响因子,因此,本文做以下改进:重大突发公共卫生事件发生后,城市各区域需求点对医疗物资的需求相当紧迫,因此,在设置时间窗时取消最早开始服务时间;由于应急医疗物资需求的时间紧迫性,以时间参数作为配送费用的主要影响因子;应急医疗物资具有政府与社会资源共同参与的特点,且政府或公益性组织在其中起主导作用,在医疗物资配送过程中,政府或公益性组织关注的是最大程度地利用应急医疗资源,需求紧迫的医疗物资需求点希望尽快获得足够的医疗物资,

政府或公益性组织可以制定激励奖惩机制,因此,把医疗物资需求点的需求紧迫度作为影响因子,同时采用使总配送费用最少,且对需求紧迫度高的医疗物资进行优先配送的双重目标。

## 2.2 模型构建

### 2.2.1 问题描述和假设

基于重大突发公共卫生事件的特点,城市各区域的医疗物资需求点都需要医疗物资。应急医疗物资具有政府与社会资源共同参与的特点,如社会募捐、各省及其他国家的援助等。一般都设立有物资配送中心。当地政府可能选定某物流企业将应急医疗物资从配送中心运送到每个需求点,然后返回配送中心。需求点的位置和医疗物资需求已知。考虑配送车辆载重、配送时间窗和医疗物资需求紧迫度等约束条件合理优化配送路径,同时使总配送费用最少,并对需求紧迫度高的需求点优先配送。

假设配送网络中有  $n$  辆配送车辆,对医疗物资的配送作基本假设:不考虑启用成本,有足够的物资配送车辆,由于重大突发公共卫生事件期间道路封锁等情况,配送车辆有限,所以应尽可能少地使用配送车辆;不考虑车辆故障等特殊情况,且道路始终处于畅通状态;配送车辆车速一定,配送任务完成后返回到配送中心;医疗物资在需求点的卸载时间不计;医疗物资需求点  $i$  的最佳配送时间窗为  $[0, L_i]$ ,其中  $L_i$  为医疗物资需求点  $i$  的最晚配送时间;单个医疗物资需求点的需求小于配送车辆载重时,每个医疗物资需求点仅能由一辆车提供配送,但每辆车在满足约束条件的前提下可对多个需求点配送。医疗配送网络中应急医疗物资的配送路径见图 2。

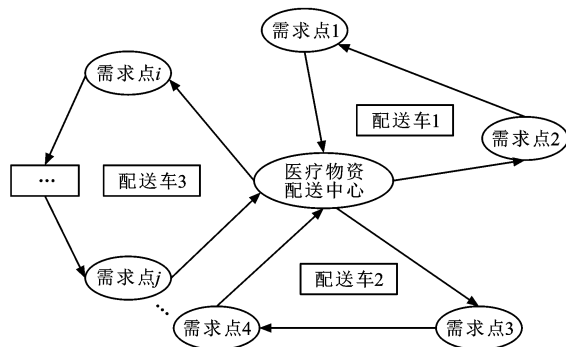


图2 应急医疗物资配送路径

Fig. 2 Distribution paths of emergency medical supplies

### 2.2.2 目标函数模型构建

在考虑上述因素的情况下,将医疗物资需求点的需求紧迫度作为影响因子,同时以总配送费用最少建立以需求紧迫度高的需求点进行优先配送的双

重目标。假设:政府或公益性组织制定奖惩机制以尽量减少配送延误,对需求紧迫度高的需求点进行优先配送,若配送延误,将根据延误时间给予经济惩罚,经济惩罚成本与总配送费用正相关;反之,结合医疗物资需求点的需求紧迫度,适当给予物流企业额外的经济补贴,经济补贴与总配送费用负相关。此时配送费用包括配送车辆行驶成本、延误惩罚成本和政府补贴。即可得车辆运行成本函数、延误惩罚成本函数和无延误时补贴费用函数分别为

$$C_{ij} = C_0 t_{ij} y_{ijk} \quad (4)$$

$$p_i = C_1 \max\{T_i - L_i, 0\} \quad (5)$$

$$b_i = C_2 \rho_i \lambda_i \quad (6)$$

式中:  $C_{ij}$  为车辆从医疗物资需求点  $i$  直接到点  $j$  ( $j=0, 1, \dots, m$ ) 的运行成本;  $C_0$  为配送车辆单位时间运行成本;  $C_1$  为配送延误时单位时间惩罚成本;  $C_2$  为配送无延误时单位补贴费用;  $p_i$  为配送车辆对医疗物资需求点  $i$  配送延误时的惩罚成本;  $b_i$  为配送车辆对医疗物资需求点  $i$  配送无延误时的补贴费用;  $t_{ij}$  为车辆从医疗物资需求点  $i$  直接到点  $j$  所需时间;  $T_i$  为配送车辆实际到医疗物资需求点  $i$  的时间;  $L_i$  为医疗物资需求点  $i$  的最晚配送时间;  $\lambda_i$  为医疗物资需求点  $i$  的相对需求紧迫度;  $y_{ijk}$  为 0-1 变量,当车辆  $k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 从物资需求点  $i$  直接到物资需求点  $j$  时,  $y_{ijk}$  为 1, 反之为 0;  $\rho_i$  为 0-1 变量,当  $T_i \leq L_i$  时,  $\rho_i$  为 1, 反之为 0。

分析组成函数可知,实现总配送费用最少只需将车辆运行成本  $C_{ij}$  与配送延误惩罚成本  $p_i$  的和最小化,即  $\min \left( \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m C_{ij} + \sum_{i=1}^m p_i \right)$ 。进一步需要实现补贴费用的最大化,即  $\max \sum_{i=1}^m b_i$ , 最后要使三者之和最小,因此,构建考虑需求紧迫度的应急物流车辆路径模型  $Z$  为

$$\min Z = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^n C_0 t_{ij} y_{ijk} + \sum_{i=1}^m C_1 \max\{T_i - L_i, 0\} - \sum_{i=1}^m C_2 \rho_i \lambda_i \quad (7)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^m g_i x_{ik} \leq q \quad (8)$$

$$k = \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^m y_{jqk} = \sum_{i=0}^m y_{qik} \quad q \neq i, q \neq j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{j0k} \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{0jk} \leq 1 \quad (12)$$

$$T_j = \sum_{i=0}^m \sum_{k=1, i \neq j}^n y_{ijk} (T_i - t_{ij}) \quad (13)$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{医疗物资需求点 } i \text{ 由车辆 } k \text{ 配送} \\ 0 & \text{反之} \end{cases} \quad (14)$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从医疗物资需求点 } i \text{ 到 } j \\ 0 & \text{反之} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $q$ 为配送车辆单车额定载质量; $g_i$ 为配送网络中医疗物资需求点 $i$ 的医疗物资需求。

### 2.2.3 算法设计

应急医疗物资配送属于多目标组合优化问题,遗传算法是模拟自然进化过程搜索最优解的方法,具有自组织、自适应和自学习性。在复杂组合优化求解时,相对其他算法能准确获取优化结果,且算法搜索始于串集,易于并行化,覆盖面大,利于全局择优。遗传算法中的适应度函数定义域可任意设定,应用范围较广<sup>[30-32]</sup>。综上,求解考虑需求紧迫度的应急医疗物资配送路径模型的遗传算法设计过程见图3。

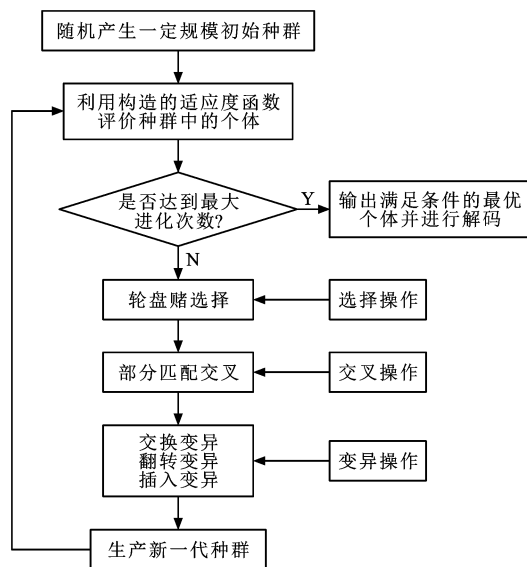


图3 遗传算法运算过程

Fig. 3 Operation process of genetic algorithm

首先采用整数编码方式进行参数编码和解码。假设配送网络中有 $m$ 个医疗物资需求点,用 $n$ 辆车完成对 $m$ 个医疗物资需求点的配送任务,则可以将整体看作1条固定长度的有序线段,该线段被等分为 $m$ 条小线段,用 $n$ 辆车完成配送任务则可以看作将上述等分的小线段划分成 $n$ 段。

其次构造适应度函数。适应度函数是遗传算法中用于评价种群中个体适应性程度的指标函数,某个体的适应性越好,则该个体越优秀,被保留并进入下一代种群的可能性也会越高<sup>[29]</sup>。鉴于研究对象是考虑配送车辆容载量约束的应急医疗物资配送路径问题,且目标函数是以函数值最小为模型优化目标,因此,使得目标函数值最小的解就是最优解。目标函数映射到适应度函数上的基因表现就是使得适应度函数值越小的个体,其适应性也越好,即医疗物资配送车辆违反自身容载量约束越少时对应的解更接近于目标问题的最优解,此时,适应度函数值也越小,因此,构造适应度评价函数为

$$f_I = z_I + pq_0 \quad (16)$$

式中: $f_I$ 为基因个体 $I$ 的适应度评价函数值; $z_I$ 为基因个体 $I$ 对应的目标函数值; $p=1\ 000$ ,为医疗物资配送车辆违反自身容载量约束惩罚系数; $q_0$ 为医疗物资配送车辆违反自身容载量约束程度。

最后选取遗传算子即筛选出适应性较好的个体。采用轮盘赌法选择种群,选用部分匹配完成交叉<sup>[33-34]</sup>,为了增加个体的多样性,采用交换变异、翻转变异和插入变异这3种变异算子进行组合变异操作。

## 3 算例分析

### 3.1 医疗物资需求点需求紧迫度

假设某城市发生重大突发公共卫生事件后,当地政府相关部门迅速反应,并及时统计城市各个辖区内灾情信息,参考城市各辖区内医疗规模、地理位置和医疗物资情况,将其分为6个医疗物资需求点,并根据统计信息计算其需求紧迫度,制定科学的医疗物资配送方案。6个医疗物资需求点的原始数据见表1,包括辖区人口、感染确诊及疑似病例、医疗物资需求点规模、医护人员数量和医疗物资缺口率。利用数据统计分析软件SPSS对各医疗物资需求点的原始数据进行标准化处理,得到的标准化数据见表2。

利用Yaahp软件构建层次结构模型,在此基础上采用德尔菲法,以背对背的通信方式征询6位交通运输工程方向专家意见,并对各个指标权重进行打分。收集处理后的数据见表3,可知:医疗物资需求紧迫度的5个评价指标的权重系数分别为0.273 4、0.273 4、0.069 2、0.081 2和0.302 8;进而计算出医疗物资需求点1~6的需求紧迫度得分分别为0.402、0.544、0.739、0.719、0.449和0.359;即得出医疗物资需求点需求紧迫度 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 分别为

表 1 各医疗物资需求点信息

Tab. 1 Information of each medical supplies demand point

需求紧迫度评价指标	辖区人口/万人	感染确诊及疑似病例/人	医疗物资需求点规模/m <sup>2</sup>	医护人员数量/人	医疗物资缺口率/%
需求点 1	1	5 417	10 611	67	40
需求点 2	64	268	63 739	90	80
需求点 3	144	3 417	35 375	77	70
需求点 4	155	3 525	88 078	60	60
需求点 5	31	5 801	61 251	90	10
需求点 6	13	4 275	20 956	76	30

表 2 各医疗物资需求点标准化信息

Tab. 2 Standardized information of each medical supplies demand point

需求紧迫度评价指标	辖区人口标准化值	感染确诊及疑似病例标准化值	医疗物资需求点规模标准化值	医护人员数量标准化值	医疗物资缺口率标准化值
需求点 1	0.00	0.93	0.00	0.21	0.43
需求点 2	0.41	0.00	0.69	0.99	1.00
需求点 3	0.93	0.57	0.32	0.57	0.86
需求点 4	1.00	0.59	1.00	0.00	0.71
需求点 5	0.19	1.00	0.65	0.96	0.00
需求点 6	0.08	0.72	0.13	0.55	0.29

表 3 指标得分

Tab. 3 Scores of indexes

评价指标	辖区人口	确诊及疑似病例	医疗物资需求点规模	医护人员数量	医疗物资缺口率
辖区人口	1	1	4	3	1
确诊及疑似病例	1	1	4	3	1
医疗物资需求点规模	1/4	1/4	1	1	1/5
医护人员数量	1/3	1/3	1	1	1/4
医疗物资缺口率	1	1	5	4	1

1.10、1.50、2.06、2.00、1.25 和 1.00。按照需求紧迫度的大小,可得算例中医疗物资需求点的排序为 3、4、2、5、1、6。

### 3.2 车辆路径模型

应急医疗物资配送车辆从配送中心出发,对 6 个医疗物资需求点进行医疗物资配送。医疗物资需求点的其他参数设置分别见表 4、5。为了减少车辆的启用数,提高利用率,将应急医疗物资配送车辆设为 3 辆。考虑到时间的紧迫性,把时间窗设定为从配送中心直接向各医疗物资需求点配送所需的最短时间,利用时间参数来表示各点间的最短运输距离<sup>[21]</sup>,再把医疗物资需求紧迫度较高的需求点时间窗等比调整,结果见表 6。医疗物资配送中心无具体的时间窗要求,因此,使医疗物资配送中心满意的最晚配送时间为 10 000 h。

表 4 医疗物资需求点参数

Tab. 4 Medical supplies demand points parameters

参数	物资配送中心 0	需求点 1	需求点 2	需求点 3	需求点 4	需求点 5	需求点 6
医疗物资需求/单位质量	0.0	4.0	3.0	1.5	4.5	1.5	2.0
最晚配送时间/h	10 000.0	2.3	0.8	2.5	2.0	2.3	2.3
各需求点相对需求紧迫度	1.00	1.10	1.50	2.06	2.00	1.25	1.00

基于 MATLAB 平台,使用遗传算法求解考虑需求紧迫度的应急医疗物资物流车辆路径模型。得到 3 条最优配送路径:路线 1 为车辆 1 从医疗物资配送中心出发,先经医疗物资需求点 2,再经过医疗物资需求点 1,然后返回;路线 2 为车辆 2 从医疗物资配送中心出发,先经医疗物资需求点 4,再经医疗

物资需求点 3,再经医疗物资需求点 6,然后返回;路线 3 为车辆 3 从医疗物资配送中心出发,经医疗物资需求点 5,然后返回。总配送费用为 1 732.8 单位费用,需求紧迫度较高的医疗物资需求点得到了优先配给,这与所构建模型结果一致。具体见表 7。

为了进一步验证构建模型的有效性,再利用



表 5 其他参数设置  
Tab. 5 Other parameter settings

参数	取值
车辆额定载质量/单位质量	8
延误时单位时间惩罚成本/单位费用	60
无配送延误时单位补贴费用/单位费用	120
车辆单位时间的行驶成本/单位费用	200

表 6 各医疗物资需求点最短距离  
Tab. 6 Minimum distances of each medical  
supplies demand point

需求点	0	1	2	3	4	5	6
0	0.00	2.00	1.80	2.00	1.50	1.20	0.80
1	2.00	0.00	1.50	1.40	1.80	1.50	1.50
2	1.80	1.50	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00
3	2.00	1.40	2.00	0.00	1.00	2.00	1.00
4	1.50	1.80	2.00	1.00	0.00	1.50	0.80
5	1.20	1.50	2.00	2.00	1.50	0.00	1.30
6	0.80	1.50	2.00	1.00	0.80	1.30	0.00

表 7 考虑与不考虑需求紧迫度的配送路线  
Tab. 7 Distribution routes considering demand urgency or not

求解结果	考虑需求紧迫度	不考虑需求紧迫度
配送路线 1	0-2-1-0	0-1-2-0
配送路线 2	0-4-3-6-0	0-6-3-4-0
配送路线 3	0-5-0	0-5-0
总配送费用/单位费用	1 732.8	1 840.8

遗传算法求解不考虑需求紧迫度的应急医疗物资物流车辆路径,将所有医疗物资需求点的需求紧迫度设置为 0,得出配送路径:路线 1 为车辆 1 从医疗物资配送中心出发,先经医疗物资需求点 1,再经医疗物资需求点 2,然后返回;路线 2 为车辆 2 从医疗物资配送中心出发,先经医疗物资需求点 6,再经医疗物资需求点 3,再经医疗物资需求点 4,然后返回;路线 3 为车辆 3 从医疗物资配送中心出发,经医疗物资需求点 5,然后返回。从配送次序可看出,需求紧迫度较高的医疗物资需求点未优先配送,总配送费用为 2 490 单位费用,由于不考虑需求紧迫度时不包含补贴费用,单独计算补贴费用,从总配送费用中扣除,最终费用为 1 840.8 单位费用,仍然大于考虑需求紧迫度时的应急医疗物资物流的总配送费用。

通过对比发现考虑需求紧迫度的最优配送路径不仅对医疗物资需求紧迫度较高的医疗物资需求点进行优先配送,同时可使总配送费用减少 5.8%;考虑与不考虑需求紧迫度的医疗物资配送路线 3 是相

同的,这是由于无论是否考虑需求紧迫度,都以总配用费用最小为目标进行优化。不考虑需求紧迫度时,即为常规车辆路径和成本(含车辆行驶成本和配送延误惩罚成本)优化问题,由于计算得出医疗物资需求点 5 的需求紧迫度相对较小,由此产生的无配送延误补贴费用对总配送费用影响较小,导致配送路线 3 相同的情况。总之,本文所构建的城市应急医疗物资配送路径优化模型对需求紧迫度较高的医疗物资需求点优先配送,同时还优化了总配送费用,验证了模型的有效性。

4 结 语

(1)通过对重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物流的分析,指出了城市医疗物资配送引入需求紧迫度的必要性。分析了医疗物资需求点需求紧迫度的相关因素,构建了以辖区人口、感染确诊及疑似病例、医疗物资需求点规模、医护人员数量、医疗物资缺口率等为评价指标的医疗物资需求点需求紧迫度评价指标体系。

(2)分析了考虑医疗物资需求紧迫度的应急物流车辆路径,指出了应急医疗物流对物资配送时间窗的要求,并合理调整时间窗,构造了单边时间窗约束条件。将医疗物资需求点需求紧迫度作为配送路径的影响因素,构造了由车辆运行成本、延误惩罚成本、无延误时补贴费用组成的总配送费用函数,以此为基础构建了城市应急医疗物资配送路径优化模型。

(3)通过对比考虑和不考虑需求紧迫度的最优配送路径的计算结果,发现考虑需求紧迫度的最优配送路径不仅对医疗物资需求紧迫度高的需求点进行优先配送,同时还优化了总配送费用,验证了模型的有效性。

(4)本文研究对象属于典型的 1 个配送中心和 1 种车型的应急医疗物资配送路径问题。现实中应急医疗物资配送时,车型有差异,且应急医疗物资的类别和数量较多。后续应深入研究多车型、多种应急医疗物资、多物资配送中心和大规模数据下的应急医疗物资配送问题,以提高优化模型的普适性;此外,利用德尔菲法进行专家评分有一定的主观性,后续可引入更为客观的方法精确求解需求紧迫度。

参考文献:  
References :

[1] 赵 飞,傅承主,矫涌本,等. 国内外突发公共卫生事件应急指挥系统建设研究[J]. 中国卫生信息管理杂志, 2012, 9(2): 25-29.



- ZHAO Fei, FU Cheng-zhu, JIAO Yong-ben, et al. Study on the construction of emergency command system for public health emergencies at home and abroad[J]. Chinese Journal of Health Informatics and Management, 2012, 9(2): 25-29. (in Chinese)
- [2] 叶冬青,查震球.我国突发公共卫生事件的新特点与应对新策略[J].中华疾病控制杂志,2009,13(1):1-3.  
YE Dong-qing, ZHA Zhen-qiu. New characteristics of public health emergencies in China and new strategies to deal with them[J]. Chinese Journal of Disease Control and Prevention, 2009, 13(1): 1-3. (in Chinese)
- [3] 黄运夏,吴广谋,李 骥.基于 Holon 的应急物流系统研究[J].物流科技,2009,24(3):42-44.  
HUANG Yun-xia, WU Guang-mou, LI Ji. A model of the emergency logistics system based on Holon[J]. Logistics Sci-Tech, 2009, 24(3): 42-44. (in Chinese)
- [4] 李 菲.化解公共危机的应急物流研究[J].交通企业管理,2009(2):53-54.  
LI Fei. Urgent logistic study in solving public crisis[J]. Transportation Enterprise Management, 2009(2): 53-54. (in Chinese)
- [5] 陈 倬.基于脆弱性分析的城市物流系统安全性研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.  
CHEN Zhuo. Security of city logistics system based on vulnerability analysis[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] CARTER W N. Natural disasters[J]. The Macedon Digest, 1994, 9(4): 32-33.
- [7] BOMPADRE A, DROR M, ORLIN J B. Improved bounds for vehicle routing solutions[J]. Discrete Optimization, 2006, 3(4): 299-316.
- [8] THOMAS A. Supply chain reliability for contingency operations[C]//IEEE. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. New York: IEEE, 2002: 61-67.
- [9] SHAHPARVARI S, ABBASI B. Robust stochastic vehicle routing and scheduling for bushfire emergency evacuation: an Australian case study[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 104: 32-49.
- [10] MORENO A, ALEM D, FERREIRA D. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics[J]. Computers and Operations Research, 2016, 69: 79-96.
- [11] BALCIK B. Site selection and vehicle routing for post-disaster rapid needs assessment[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 101: 30-58.
- [12] SAKURABA C S, SANTOS A C, PRINS C, et al. Road network emergency accessibility planning after a major earthquake[J]. Euro Journal on Computational Optimization, 2016, 4: 1-22.
- [13] BRUNI M E, BERALDI P, KHODAPARASTI S. A fast heuristic for routing in post-disaster humanitarian relief logistics[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 30: 304-313.
- [14] BOUCHRA B, BTISSAM D, MOHAMMAD C. A hybrid genetic algorithm for the static and dynamic vehicle routing problem with soft time windows[C]//IEEE. The 3rd International Conference on Logistics Operations Management. New York: IEEE, 2016: 1-9.
- [15] 李 创.国内外应急物流研究综述[J].华东经济管理,2013,27(6):166-171.  
LI Chuang. Review on domestic and foreign research on emergency logistics[J]. East China Economic Management, 2013, 27(6): 166-171. (in Chinese)
- [16] 王宗喜.大力推进应急物流建设与发展[J].中国流通经济,2009(24):37-39.  
WANG Zong-xi. Vigorously promoting construction and development of emergency logistics[J]. China Business and Market, 2009(24): 37-39. (in Chinese)
- [17] 邹志云,宋 程,魏向阳.基于灰色理论的应急物流最优路径选择[J].物流技术,2007,27(1):46-48.  
ZOU Zhi-yun, SONG Cheng, GUO Xiang-yang. How to select the optimal emergent logistics route based on grey theory[J]. Logistics Technology, 2007, 27(1): 46-48. (in Chinese)
- [18] 程碧荣,赵晓波,秦 进.考虑供应不足的应急物流车辆路径优化模型及算法[J].计算机应用研究,2016,33(6):1682-1685.  
CHENG Bi-rong, ZHAO Xiao-bo, QIN Jin. Optimization model and algorithm of emergency vehicle route with insufficiency supply[J]. Computer Application Research, 2016, 33(6): 1682-1685. (in Chinese)
- [19] HUANG Xiao-xia, SONG Li-ying. An emergency logistics distribution routing model for unexpected events[J]. Annals of Operations Research, 2018, 269(6): 1-17.
- [20] 宋英华,艾艳芳,王 喆,等.考虑商业物流资源的应急物流定位-分配问题模型[J].中国安全科学学报,2016,26(11):157-162.  
SONG Ying-hua, AI Yan-fang, WANG Zhe, et al. Research on LAP model of emergency logistics considering commercial logistics resources[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(11): 157-162. (in Chinese)
- [21] 杨 郑.考虑需求紧迫度的应急物流车辆路径问题研究[D].西安:长安大学,2018.  
YANG Zheng. Research on vehicle routing problem of emergency logistics considering the demand urgency [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [22] 崔 岩,张子祥,时 新,等.考虑顾客时间紧迫度的生鲜电商配送路径优化问题[J].郑州大学学报(工学版),2017,38(6): 59-63.  
CUI Yan, ZHANG Zi-xiang, SHI Xin, et al. Fresh agricultural product e-commerce distribution routing problem considering time demand of customer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(6): 59-63. (in Chinese)
- [23] 张玉州,徐廷政,郑军帅,等.考虑紧急度的救灾车辆路径问题建模与优化[J].计算机应用,2019,39(8):2444-2449.  
ZHANG Yu-zhou, XU Ting-zheng, ZHENG Jun-shuai, et al.

- Modeling and optimization of disaster relief vehicle routing problem considering urgency[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(8): 2444-2449. (in Chinese)
- [24] 黄敏芳,刘敬,郭琼.带时间窗的电动汽车物流配送车辆路径问题研究[J].物流技术,2019,38(5):66-72.  
HUANG Min-fang, LIU Jing, GUO Qiong. Research on routing problem of electric distribution vehicles with time window [J]. Logistics Technology, 2019, 38(5): 66-72. (in Chinese)
- [25] 李珍萍,张煜炜.带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题[J].控制与决策,2019,34(7):1565-1570.  
LI Zhen-ping, ZHANG Yu-wei. Multiple demands vehicle routing problem with time windows and service order constraints[J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1565-1570. (in Chinese)
- [26] 胡大伟,陈希琼,高扬.定位-路径问题综述[J].交通运输工程学报,2018,18(2):111-129.  
HU Da-wei, CHEN Xi-qiong, GAO Yang. Review on location-routing problem[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 111-129. (in Chinese)
- [27] 曲冲冲,王晶,黄钧,等.考虑时效与公平性的震后应急物资动态配送优化研究[J].中国管理科学,2018,26(6):178-187.  
QU Chong-chong, WANG Jing, HUANG Jun, et al. Study on optimization of dynamic distribution of emergency materials after earthquake considering timeliness and fairness[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(6): 178-187. (in Chinese)
- [28] 王婧,王海军.应急救援中应急物资需求紧迫性分级研究[J].计算机工程与应用,2013,49(5):4-7.  
WANG Jing, WANG Hai-jun. Gradation for demand urgency of emergency materials in emergency relief[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(5): 4-7. (in Chinese)
- [29] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.  
GUO Jin-yu, ZHANG Zhong-bin, SUN Qing-yun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese)
- [30] 赵诗奎.基于遗传算法的柔性资源调度优化方法研究[D].杭州:浙江大学,2013.  
ZHAO Shi-kui. Research on the optimization method for flexible resource scheduling based on genetic algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [31] 王正武,陈涛,宋名群.同时接送模式下响应型接驳公交运行路径与调度的协调优化[J].交通运输工程学报,2019,19(5):139-149.  
WANG Zheng-wu, CHEN Tao, SONG Ming-qun. Coordinated optimization of operation routes and schedules for responsive feeder transit under simultaneous pick-up and delivery mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 139-149. (in Chinese)
- [32] 张铃,张钺.遗传算法机理的研究[J].软件学报,2000,11(7):945-952.  
ZHANG Ling, ZHANG Ba. Differentiated services for the internet based on dynamic buffer thresholds[J]. Journal of Software, 2000, 11(7): 945-952. (in Chinese)
- [33] 余朝军,江驹,徐海燕,等.基于改进遗传算法的航班-登机口分配多目标优化[J].交通运输工程学报,2020,20(2):121-130.  
YU Chao-jun, JIANG Ju, XU Hai-yan, et al. Multi-objective optimization of flight-gate assignment based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 121-130. (in Chinese)
- [34] HU Hui, HE Jing, HE Xiong-fei, et al. Emergency material scheduling optimization model and algorithms: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(5): 441-454.