

低碳视角下基于机器学习的医疗救援中心选址研究



□彭舒悦 刘勤明 李佳翔

[上海理工大学 上海 200093]

[摘要] 针对伤员遭受突发灾害又无法获得及时救援这一情形,以医院向救援中心输送物资的距离和时间为重点,提出一种低碳视角下的应急医疗救援中心选址模型。首先,以上海市为例,基于机器学习的K-means聚类,将上海市划分成四个子区域,使用直线相连法确定各子区域的初始备选点。其次,使用熵权法,从各子区域的初始备选点中筛选出几个最终备选点。最后,通过考虑运输成本、碳排放成本和晚到惩罚成本,计算各子区域内所有医院到救援中心的总成本,将总成本最小的点确定为各子区域的最优选址点,确保每个医院都能向就近的救援中心提供医疗资源。通过对选址结果进行可行性分析,模型得出的最优选址点可作为上海市后续医疗救援中心选址参考。

[关键词] 医疗救援中心选址;机器学习;熵权法;碳排放成本;晚到惩罚成本

[中图分类号] TU984.116

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2023)-3033

引言

近年来,地震、洪水、新冠疫情等灾害事件频发,这些事件具有突发性、不确定性和复杂性等特点。灾害发生后,现有的医疗救助资源通常难以满足受灾群众的需求,需要建立更多基于医院之外的救援中心为受灾群众提供医疗救援。但由于我国人口密集,现有的救援中心往往存在位置偏僻、路况复杂和交通不便等问题^[1]。此外,我国于2020年提出了“双碳”目标,所以基于城市基础碳排放的总体要求,优化救援中心选址问题不仅要为医院和受灾群众提供便利,也要尽量减少医院向救援中心运输物资过程中的碳排放量^[2]。因此,建立医疗救援中心既要满足“便利”原则,也要满足“低碳”原则。

在应急中心选址方面,孙硕等^[3]提出了以总的运输代价最小化和配送代价最小化为目标的双层动态交互的选址-调度模型,设计了一种混合嵌套算法,提高了模型的有效性和准确性。许伦辉等^[4]采用免疫优化算法求解应急物资中心选址模型,同时用多层编码的遗传算法制定了物资调度配送方案,形成了一套高效且合理的选址-调度方案。孙强^[5]建立了一个带时间窗的应急物流中心选址模型,并利用改进的人工蜂群算法对模型进行求解,提高了应急救援的时间满意度。王付宇等^[6]建立了以救援车辆行驶时间最短和救援总成本最少为目标的双层选址模型,使用惯性权重萤火虫算法进行求解,提高了选址过程中的效率。在考虑低碳目标的选址方面,胡大伟等^[7]考虑了速度和负载对能量消耗和CO₂排放的影响,分别建立了燃油车和电动车的两

[收稿日期] 2023-03-03

[基金项目] 国家自然科学基金(71632008, 71840003);上海市自然科学基金(19ZR1435600);教育部人文社会科学研究规划基金(20YJAZH068);上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ038);2021年上海市大学生创新创业训练计划项目(SH2021078)。

[作者简介] 彭舒悦,上海理工大学管理学院硕士研究生;李佳翔,上海理工大学管理学院硕士研究生。

[通信作者] 刘勤明,博士,上海理工大学管理学院教授。E-mail: lqm0531@163.com。

[引用格式] 彭舒悦,刘勤明,李佳翔. 低碳视角下基于机器学习的医疗救援中心选址研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2024, 26(2): 28-37. DOI: 10.14071/j.1008-8105(2023)-3033.

[Citation Format] PENG Shu-yue, LIU Qin-ming, LI Jia-xiang. Machine learning-based location for medical rescue centers from the perspective of low-carbon[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China(Social Science Edition), 2024, 26(2): 28-37. DOI: 10.14071/j.1008-8105(2023)-3033.

阶段开放式选址路径模型，并使用改进的模拟退火算法求解。蒋海青等^[8]考虑了需求动态变化时的场景，提出了预优化和实施优化的两阶段选址-路径问题，建立了相应的低碳模型，并用四阶段混合量子差分进化算法求解。林殿盛等^[9]在物流配送中心选址问题上，同时考虑了需求不确定和低碳的问题，建立了包含碳排放成本在内的总成本最低为目标，不确定需求为约束的选址模型。Zhang 等^[10]从新旧冷链物流配送中心的竞争角度，考虑了消费者的选择，建立了基于低碳排放的冷链物流配送中心的双层选址模型。Zonouzi 等^[11]提出了基于数据挖掘方法的选址模型，在能够最大化覆盖需求点的情况下，对救援站进行选址。大多数学者首要考虑的是满足用户需求的选址问题，很少有学者从供给角度出发，并将低碳问题和救援中心选址问题结合起来考虑，而这两者的结合对目前社会发展有实际意义。

本文将低碳视角下的医疗救援中心选址作为研究内容，从医院为救援中心提供资源时花费成本最小的角度出发，采用三层筛选框架对选址点进行筛选，确保救援中心位置的效率性、科学性和公平性。首先，以上海市为例，使用K-means聚类算法对医院位置进行聚类，聚类结果与上海市行政区域相结合，将上海市划分成几个子区域以便在其中进行独立选址。在每个子区域中，用直线连接任意两个医院，选择直线交点最多的位置作为救援中心的初始备选点。其次，构建救援中心选址指标体系，使用熵权法对于每个初始备选点进行第二层筛选，将综合得分较高作为救援中心的最终备选点。最后，对备选点进行第三次筛选，保证每个医院只对

其所属子区域内的救援中心提供医疗资源，同时考虑运输成本、碳排放成本和晚到惩罚成本，计算各子区域内所有医院到每个备选点的总成本，选择总成本最小的点作为该区域内救援中心的最优选址点。

一、问题描述

基于医院的位置划分子区域，通过在每个子区域内选择合适的位置作为医疗救援中心，以解决突发事件且导致现有医院无法接收更多患者时，伤者可以向就近的医疗救援中心寻求医疗救援的问题。救援中心所需的医疗资源由所属子区域的医院向其提供，运输医疗资源的过程中实现总成本最小的目标。

按照规模大小和硬件设备的不同，医院可划分为三个等级：一级医院（社区医院）、二级医院和三级医院。虽然社区医院和二级医院的数量较多，但仅能为居民提供简单的医疗服务，医疗资源和设备相对匮乏，难以对伤情严重的患者提供全面的救治。三级医院具有先进的医疗资源和设备，能够针对伤者的不同情况提供相应的救治和检查，但其数量较少，且位置相对集中在市区，难以实现地区全覆盖。因此本文只考虑基于三级医院位置进行医疗救援中心的选址，即由三级医院向救援中心提供医疗资源和设备。在每个子区域内进行单独选址，最终确保每个子区域内有且仅有一个医疗救援中心，各医疗救援中心只由该子区域内的三级医院向其提供医疗物资，方便受灾群众根据自己的地理位置选择就近的医疗救援中心寻求救助，使位置相对偏远的伤者也可以获取更加全面的救援服务。具体选址流程如图1所示。

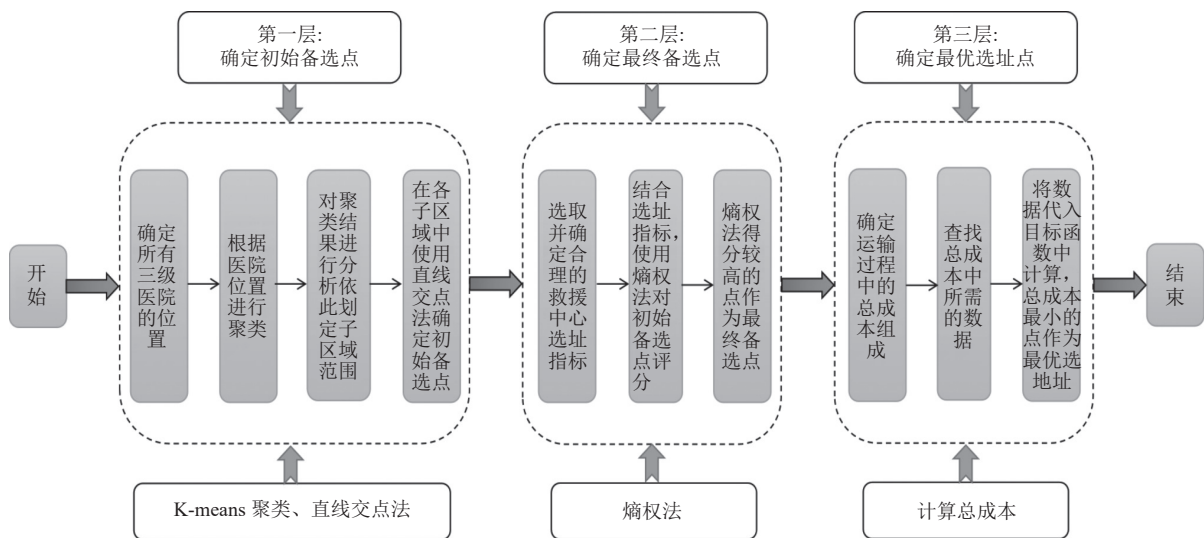


图 1 三层筛选框架流程图

二、符号说明和假设

(一) 符号说明

模型中所涉及的符号含义及说明如表1所示。

表 1 模型中所涉及的符号含义及说明

符号	含义
I	子区域集合, $I = \{1, 2, \dots, r\}, i \in I$;
N_i	子区域 i 中医疗救援中心初级备选点的集合, $N_i = \{1, 2, \dots, u\}, n_i \in N_i$;
K_i	子区域 i 中医疗救援中心最终备选点的集合, $K_i = \{1, 2, \dots, v\}, k_i \in K_i$;
J_i	子区域 i 中医院的集合, $J_i = \{1, 2, \dots, w\}, j_i \in J_i$;
$d_{j_i k_i}$	子区域 i 中医院 j_i 到最终备选点 k_i 的距离;
Z_{k_i}	决策变量, 若在子区域 i 中的最终备选点 k_i 处建立医疗救援中心, 则值为 1, 否则为 0;
$X_{j_i k_i}$	决策变量, 若子区域 i 中的医院 j_i 向最终备选点 k_i 提供医疗物资, 则值为 1, 否则为 0;
$t_{j_i k_i}$	子区域 i 中的医院 j_i 到医疗救援中心最终备选点 k_i 的平均时间;
$t'_{j_i k_i}$	子区域 i 中的医院 j_i 到医疗救援中心最终备选点 k_i 的畅行时间;
c	油价, 元/升;
ρ_0	车辆空载时每公里耗油量, 升/公里;
ρ	车辆满载时每公里耗油量, 升/公里;
λ	针对 CO ₂ 排放所征收的税金, 即碳税价格;
μ	CO ₂ 排放系数;
a	晚到惩罚因数, 元/分钟;
F_1	运输成本;
F_2	碳排放成本;
F_3	晚到惩罚成本;
F	总成本, 包含运输、碳排放和晚到惩罚成本。

(二) 模型假设

本文有以下假设:

1. 医疗救援中心的容量足够大, 可以容纳该子区域内所有医院分配的医护人员和医疗物资;
2. 各子区域中, 患者优先去往医院接受治疗, 医院容量已满时才会去往医疗救援中心寻求救助;
3. 医疗救援中心的床位数足以容纳该区域内剩余患者 (因医院床位已满而无法接受治疗的患者);
4. 运输医疗资源的车辆数量没有限制且为某一单一车型, 车辆的规格一致;
5. 不考虑单个医疗物资的实际规格及重量;
6. 车辆每次从医院到医疗救援中心运输的医疗物资量是固定的, 达到车辆满载运输, 车辆只有空载和满载两种状态;

7. 不同子区域的医疗救援中心之间的医疗物资需求是互相独立的, 且只由对应区域内的医院提供, 不同区域的医疗救援中心需求互不干扰。

三、模型构建

本文的总成本主要考虑运输成本、低碳成本和晚到惩罚成本, 使医院向救援中心提供医疗物资的过程中, 不仅距离最优, 还能实现低碳的目标。按照医院位置分布情况, 根据聚类结果和地理位置分析, 将某一地区划分成几个范围较小的子区域, 以保证不同位置的患者都可以优先选择最近的医疗救援中心寻求帮助; 在每个子区域中将范围内的任意两个医院进行连线, 选择直线交点最多的前 n 个点作为医疗救援中心的初始备选点, 确保救援中心距每个医院的距离都相对最近; 对于初始备选点, 建立选址指标体系, 使用熵权法对指标进行赋权, 并计算每个初始备选点的得分, 得分最高的 $m (1 < m < n)$ 个点是最终的医疗救援中心备选点; 对于最终备选点, 考虑医院到达救援中心的总成本最小, 选择总成本最小的点作为该子区域的医疗救援中心的最佳选址点。

(一) 构建最终备选点的选址指标评价体系

我国目前没有出台和救援中心选址原则相关的政策文件, 但是通过参考关于《应急避难场所的规划原则》和相关文献^[12], 最终确定了 6 个关键且易于获取数据的选址指标:

1. 人口密度。医疗救援中心应建立在人员密集且人流量大的区域, 有助于发生突发事件后人员可以就近寻求帮助, 因此人口密度是救援中心选址中的重要指标。本文计算人口密度方法为:

$$\text{人口密度 (人/km}^2\text{)} = \frac{\text{人口数量 (人)}}{\text{所属街道面积 (km}^2\text{)}}$$

2. 与主干道距离。医疗救援中心应优先选择建立在离城市主干道较近的位置, 离主干道越近, 交通越方便, 对不同位置的医院和受灾群众来说都可以尽快到达救援中心。

3. 道路节点数。指该地点可以连接的路口的数量, 如图 2 所示。道路节点度越大, 救援中心可以连通的道路就越多, 对受灾群众越方便。

4. 道路宽度。道路的宽度直接决定了人员在该道路上的通过量。医疗救援中心所在的道路宽度越宽, 可以在同一时间段内通过的提供物资车辆和寻求救援的人员就越多。

5. 与最近公安机构的距离。如果医疗救援中心

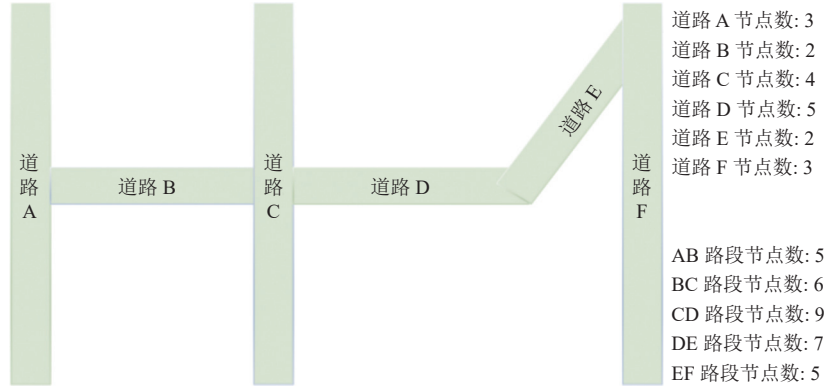


图2 道路节点数示意图

距离政府公安机关距离较远, 当有大量物资车辆和受灾群众到达时, 可能发生秩序混乱、道路拥堵的现象。因此救援中心应靠近公安机关, 以维持公共秩序, 有序提供救援。

6. 周边环境(与最近河流水系的距离)。由于救援中心提供的是医疗救援服务, 会用到大量的医疗化学药品和医疗器械, 且配送医疗物资的车辆会产生汽车尾气污染。因此, 医疗救援中心的选址应远离河流、湖泊等景点, 以防止医疗废弃物和排放的尾气对水资源产生不可逆的污染^[13]。

(二) 医疗救援中心选址总成本模型

以往的救援中心选址更多地考虑位置因素和车辆路径问题, 通常以配送距离最短或者配送时间最少为目标。本文从低碳角度出发, 通过对每个子区域独立选址, 以解决医院到救援中心的运输成本、碳排放成本和晚到惩罚成本最小的救援中心选址问题。

车辆从医院到医疗救援中心运输医疗物资的过程中, 每次都是满载送至空载而归, 车辆耗油量只与车辆装载状态有关, 本文只考虑满载和空载两种状态。所以本文的运输成本只考虑运输距离、每单位距离耗油量和每单位距离油价这三个因素:

$$F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{k_i \in K_i} \sum_{j_i \in J_i} [d_{j_i k_i} (\rho_0 + \rho) c X_{j_i k_i} Z_{k_i}] \quad (1)$$

在运输过程中, 碳排放主要由运输车辆从医院到救援中心所消耗的燃油产生, 而燃油消耗量与运输距离和车辆装载状态等因素相关。同时, 碳排放量 = CO₂排放系数 × 燃油消耗量, 因此:

$$F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{k_i \in K_i} \sum_{j_i \in J_i} [\lambda \mu (\rho_0 + \rho) d_{j_i k_i} X_{j_i k_i} Z_{k_i}] \quad (2)$$

在实际运输中, 道路拥堵状况难以避免, 车辆在拥堵等待的过程中会增加碳排放量和医疗物资运输时间, 从而影响救援活动的开展^[14]。本文衡量晚到的标准为: 车辆从医院到医疗救援中心的运输过

程中, 若行驶的平均时间大于行驶前规划的不拥堵情况下的最短时间, 则视为“晚到”。所以, 本文引入了晚到惩罚因数 a , 用来衡量拥堵导致晚到时所增加的成本。因此, 本文定义的平均行驶时间和晚到惩罚成本为:

平均行驶时间 = η 个时间段的畅行时间 × 每个时间段的拥堵系数 / η

$$F_3 = \sum_{i \in I} \sum_{k_i \in K_i} \sum_{j_i \in J_i} [a (t_{j_i k_i} - t'_{j_i k_i}) X_{j_i k_i} Z_{k_i}] \quad (3)$$

因此, 医疗救援中心选址总成本为:

$$F = \min(F_1 + F_2 + F_3) =$$

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{k_i \in K_i} \sum_{j_i \in J_i} [d_{j_i k_i} (\rho_0 + \rho) c X_{j_i k_i} Z_{k_i} + \lambda \mu (\rho_0 + \rho) d_{j_i k_i} X_{j_i k_i} Z_{k_i} + a (t_{j_i k_i} - t'_{j_i k_i}) X_{j_i k_i} Z_{k_i}] \quad (4)$$

s.t.

$$t_{j_i k_i} \geq t'_{j_i k_i}, \forall i \in I, k_i \in K_i, j_i \in J_i \quad (5)$$

$$X_{j_i k_i} \leq Z_{k_i}, \forall i \in I, k_i \in K_i, j_i \in J_i \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j_i \in J_i} X_{j_i k_i} \geq 1, \forall k_i \in K_i \quad (7)$$

式(4)是目标函数, 代表每个区域的医疗救援中心选址的总成本最小。式(5)保证了车辆运输过程中只有行驶的平均时间大于最短时间时, 才会产生晚到惩罚成本。式(6)约束了只有当备选点 k_i 被选为最终救援中心进行建设时, 才满足医院 j_i 向其提供救援服务的条件。式(7)表示每一个救援中心都会有对应区域内的医院为其提供救援服务。

四、基于三层筛选框架的备选点选择

(一) 初始备选点筛选

医疗救援中心的初始备选点是分区域确定的, 每个子区域中初始备选点的确定都是相互独立的。

具体过程如下:

Step 1: 查找某一地区所有三级医院名称和地址;

Step 2: 用百度地图开放平台中的正地理编码功能, 将所有的医院地址转化为经纬度坐标;

Step 3: 利用经纬度坐标在地图上做出医院标记点;

Step 4: 使用K-means聚类对医院的地理坐标进行聚类, 根据聚类结果同时结合地域特征, 对医院进行区域划分, 确保每个医院都有所属的子区域;

Step 5: 在每个子区域中, 将任意两个医院直线相连, 选择直线交点最多的前 n 个点作为医疗救援中心的初始备选点, 目的是首先确保救援中心到每个医院的距离总和相对最小, 减小医疗物资的运输距离。

(二) 最终备选点筛选

确定好医疗救援中心的初始备选点后, 结合事先定好的选址指标, 使用熵权法给每个指标赋予不同权重, 然后按照权重计算每个初始点的综合得分, 选取得分最高的前 $m(1 < m < n)$ 个点作为医疗救援中心的最终备选点。熵权法的具体计算过程如下:

Step 1: 指标正向化。指标分为四种——极大型指标 (越大越好)、极小型指标 (越小越好)、中间型指标 (越接近某个值越好)、区间型指标 (在某个区间内最好)。指标正向化是将所有的指标都转化为极大型指标, 便于后续的操作, 其中原指标序列为 $X = \{x_i\} = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$, 正向化后的极大型指标序列为 $X_{\text{new}} = \{x'_i\} = \{x'_1, x'_2, x'_3, \dots\}$;

极小型→极大型: 若 $\{x_i\}$ 是一组极小型指标序列, 那么正向化的公式为:

$$x'_i = \max\{x_1, x_2, x_3, \dots\} - x_i \quad (8)$$

中间型→极大型: 若 $\{x_i\}$ 是一组中间型指标序列, x_{best} 为指标的最优值, 那么正向化的公式为:

$$M = \max\{|x_i - x_{\text{best}}|\}, x'_i = 1 - |x_i - x_{\text{best}}|/M \quad (9)$$

区间型→极大型: 若 $\{x_i\}$ 是一组区间型指标序列, 且最佳的区间为 $[a, b]$, 那么正向化的公式为

$$M = \max\{a - \min\{x_i\}, \max\{x_i\} - b\} \quad (10)$$

$$x'_i = \begin{cases} 1 - (a - x_i)/M, & x_i < a \\ 1, & a \leq x_i \leq b \\ 1 - (x_i - b)/M, & b < x_i \end{cases} \quad (11)$$

Step 2: 标准化处理, 该步骤是为了消除指标间存在的差异从而带来的误差。若共有 g 个评价对象, h 个评价指标, x_{pq} 为第 p 个对象在第 q 项指标的

值, 标准化后的指标为 z_{pq} , 则

$$z_{pq} = \frac{x_{pq} - \min\{x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{gq}\}}{\max\{x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{gq}\} - \min\{x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{gq}\}} \quad (12)$$

Step 3: 计算每个指标所占的比重, 所有指标的比重之和为1,

$$g_{pq} = \frac{z_{pq}}{\sum_{p=1}^g z_{pq}}, p = 1, \dots, g; q = 1, \dots, h \quad (13)$$

Step 4: 计算每个评价指标的信息熵 e_q ,

$$e_q = -k \sum_{p=1}^g g_{pq} \ln(g_{pq}) \quad (14)$$

其中,

$$k = \frac{1}{\ln g} > 0, e_q \geq 0 \quad (15)$$

Step 5: 计算每个评价指标的权重,

$$w_q = \frac{1 - e_q}{h - \sum_{q=1}^h e_q} = \frac{1 - e_q}{\sum_{q=1}^h (1 - e_q)} \quad (16)$$

Step 6: 利用加权求和公式, 计算每个评价对象的综合得分,

$$S_p = \sum_{q=1}^h w_q * z_{pq} \quad (17)$$

五、案例分析

上海市是我国的金融经济中心, 截至2021年底, 上海市常住人口达到2500万, 但上海市卫健委批准通过的三级医疗机构仅有不到100个 (包括同一医院不同院区), 一旦发生突发性灾害事件, 三级医院的数量和容量难以满足救治伤员的需求。因此, 本文将上海市作为实例分析的对象 (由于崇明区独立于其他行政区域, 人口较少且有稳定的医疗资源, 故不作为本文区域考虑的对象)。依据上海市三级医院位置进行医疗救援中心选址, 选址流程以本文提出的三层筛选框架为准, 以确保灾害事件发生时, 在符合低碳条件的同时, 医院可以就近向救援中心输送医疗资源, 尽量满足救助需求。

(一) 确定初始备选点

1. 利用K-means聚类划分子区域

根据上海市卫生健康委员会官网公布的三级医疗机构的信息, 将所有三级医疗机构的位置信息进行了整合, 利用百度地图开放平台爬取了每个医院的地理坐标, 使用K-means算法, 对地理坐标进行聚类。为了方便规划和管理, 划分子区域的同时不

仅参考了聚类结果，也将周边行政区和中心行政区进行结合，最终将上海市按行政区域就近划分为 4 个子区域，分别为：区域一（青浦区、松江区、金山区、闵行区、奉贤区）；区域二（长宁区、黄浦区、徐汇区）；区域三（嘉定区、宝山区、普陀区、静安区）；区域四（杨浦区、虹口区、浦东区）。各子区域内的三级医院位置坐标如表 2 所示。

表 2 各子区域三级医院位置坐标

区域	序号	名称	地址	经度	纬度
区域一	1	复旦大学附属儿科医院	上海市万源路399号	121.402531	14.585789
	2	复旦大学附属华山医院	闵行区金光路958号	121.278736	27.873570
					
	12	上海市闵行区中心医院	莘凌路39号	121.380873	38.087303
	13	上海市松江区中心医院	中山中路746号	121.228323	22.832279
区域二	1	复旦大学附属儿科医院	医学院路130号	121.462590	31.195969
	2	复旦大学附属妇产科医院	黄浦区方斜路419号	121.440143	31.218685
					
	24	上海中医药大学附属龙华医院	上海市宛平南路725号	121.455961	31.194195
	25	上海中医药大学附属曙光医院	上海市普安路185号	121.484861	31.228835
区域三	1	复旦大学附属华山医院	华山路433号	121.451003	31.223616
	2	复旦大学附属华山医院北院	宝山区陆翔路108号	121.381029	31.350846
					
	17	上海中医医院	石门一路67弄1号	121.469548	31.231516
	18	上海交通大学医学院附属瑞金医院	嘉定区双丁路789号	121.275454	31.343290
区域四	1	复旦大学附属妇产科医院	沈阳路128号	121.540123	31.265319
	2	复旦大学附属华山医院	浦东新区红枫路525号	121.601874	31.244945
					
	28	上海中医药大学附属曙光医院	张衡路528号	121.599244	31.193251
	29	复旦大学附属肿瘤医院	红曲路688号	121.624844	31.118223

2. 直线交点法确定初始备选点

根据划分子区域的结果，在四个子区域中分别进行任意两个医院的连线。同时考虑将备选点确定在医院密度相对较小且空地范围较大的地方，防止医疗资源过度集中，因此选择直线交点较多的位置作为医疗救援中心的初始备选点。最终，区域一至区域四分别确定了 4、6、5、5 个初始备选点，结果如图 3 所示。其中灰色十字表示该区域内三级医院的位置，红色圆点表示该区域内初始备选点的位置，每个初始备选点的地理位置坐标如表 3 所示。

(二) 确定最终备选点

1. 确定选址指标体系及数据

确定好每个子区域的初始备选点位置后，使用熵权法对初始备选点进行进一步的筛选，以确定最终备选点。通过参考资料并对实际情况进行分析，最终确定了 6 个选址指标，分别为：人口密度、与主干道距离、道路节点数、道路宽度、与最近公安机构的距离以及周边环境（与最近河流水系的距离）。本文已在第三部分对各个选址指标进行了详细描述，在此不再进行过多介绍。

选址指标的数据来源如下：人口密度的数据以

第六次人口普查公布的数据为准，范围精确到初始备选点所在的街道办事处，以街道的人口密度作为备选点的人口密度数据；与最近公安机构的距离由“邮编库”官网根据具体位置查询所得；与主干道距离和与最近河流水系的距离指备选点到主干道和最近河流的直线距离；其余数据在百度地图上搜索爬取获得。

2. 确定指标权重及最终备选点

获取数据后，使用熵权法进行计算发现每个指标在不同子区域对备选点的影响程度不同。通过进一步计算，可以得到每个初始备选点的综合得分，因此按每个点的综合得分决定保留哪些为最终备选点，得分较高的点保留为最终备选点，得分差距过大的备选点去除，具体结果由 Matlab R2018a 计算所得，如表 4 所示。

(三) 确定最优选址点

利用熵权法得到最终备选点后，通过计算医院到各备选点的总成本，以求得最优选址点。

1. 参数设置

通过参考其他文献和相关材料，合理确定了目标函数中的变量和参数值。由于运输医疗资源所用

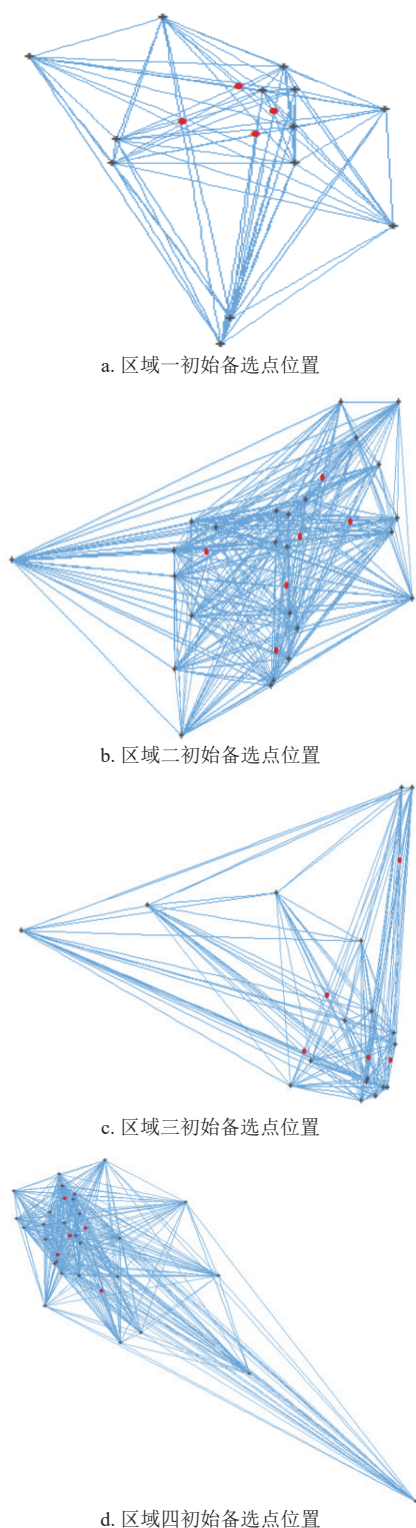


图 3 直线交点法确定初始备选点

的救护车消耗柴油, 因此油价 c 设为柴油单价, 8.13 元/升; 在运输过程中, 假设车辆保持匀速行驶, 满载状态下每公里的耗油量 ρ 为 0.17 升/公里, 空载状态下每公里的耗油量 ρ_0 为 0.14 升/公里; 目前, 我国在征收碳税方面的争议很大, 且客观条件不够成熟, 我国关于碳征税的事宜还没有明确政策, 因此本文的碳税价格以澳大利亚实行的碳税征

表 3 各子区域初始备选点位置坐标

区域	序号	地址	经度	纬度
区域一	1	松江区新蟠路	121.287859	31.063992
	2	松江区疏影路1315号	121.348194	31.116493
	3	闵行区申南路354号	121.383997	31.078014
	4	闵行区元电路	121.367970	31.048716
区域二	1	徐汇区斜土路2181号	121.444263	31.194638
	2	徐汇区岳阳路281号	121.448446	31.204223
	3	黄浦区长乐路318号	121.459204	31.223377
	4	黄浦区复兴中路467号	121.467594	31.216567
	5	长宁区平武路38号	121.425702	31.210747
	6	徐汇区襄阳南路242号	121.452872	31.212319
区域三	1	静安区林陵路343号	121.447578	31.252136
	2	宝山区大华三路25号	121.417442	31.280013
	3	宝山区泰兴桥路	121.477733	31.375102
	4	普陀区北石路440弄24号	121.392983	31.247921
	5	静安区天目中路393号	121.462506	31.246864
区域四	1	浦东新区北张家浜路	121.522027	31.219328
	2	杨浦区双阳北路358路	121.522425	31.295325
	3	浦东新区商城路	121.531128	31.238940
	4	浦东新区御秀路	121.575608	31.154369
	5	浦东新区德平路76弄4号	121.555355	31.252598

收方案为标准, 换算成人民币后碳税价格 λ 为 0.2 元/千克; 根据 BP 中国碳排放计算提供的资料, 使用柴油的 CO_2 排放系数 μ 为 2.63 千克/升; 本文设定的晚到惩罚机制为每晚到 1 分钟, 要支付 10 元的惩罚成本, 因此“晚到惩罚系数” a 的值为 10 元/分钟。

医院到救援中心的时间数据由百度地图测得。由于测量数据时为上海疫情封控期, 车流量较少, 所以本文用“拥堵系数 (实际行程时间和畅通行程时间的比值, 若两种时间相同, 则值为 1)”作为连接, 把特殊时期的通行时间利用去年和今年的“拥堵系数”进行换算, 得到非封控时期普通交通流量下的通行时间。通过选取某工作日四个不同的时间段测试行驶时间, 代表一天中的通行时间差距, 其中包括上下班的高峰期和非高峰期时段, 分别为 8:00-9:00、11:30-12:30、14:30-15:30 和 18:00-19:00。选取四个时间段中通行时间最短的作为畅行时间 t_{j,k_i}' 。同时, 将四个时间段的行驶时间进行平均计算, 求出医院到救援中心行驶过程的平均时间 t_{j,k_i} 。将平均时间和畅行时间的差值作为目标函数中的“晚到惩罚时间”。同时, 医院到救援中心的距离 d_{j,k_i} 也由百度地图测得, 以两点间的最短距离为准。每个区域中各医院到备选点的时间和距离如表 5~表 8 所示。

2. 计算总成本

获得以上数据后, 将数据代入目标函数中, 分别计算各区域医院到每个最终备选点的运输成本、

碳排放成本和晚到惩罚成本，并将这三部分成本进行相加，求得医院到每个备选点的总成本，选择总成本最小的备选点作为每个区域的救援中心的最优选址点，计算结果如表9所示。

通过计算目标函数，得出了每个区域总成本最小的医疗救援中心选址点，具体位置如下：区域一

（青浦区、松江区、金山区、闵行区、奉贤区）的医疗救援中心最优选址点为备选点3号，位于闵行区申南路354号；区域二（长宁区、黄浦区、徐汇区）的医疗救援中心最优选址点为备选点3号，位于黄浦区长乐路318号；区域三（嘉定区、宝山区、普陀区、静安区）的医疗救援中心最优选址点

表 4 熵权法计算结果

区域	序号	备选点位置	人口密度/ 人.km ²	与主干道距离/ km	道路节点数	道路宽度 /m	与最近公安机 构的距离/ km	与最近河流水 系的距离/ km	综合得分	排名	是否 保留
区域一	备选点1	松江区新蟠路	4346.49	0.52	7	15.00	1.75	0.42	0.1033	2	是
	备选点2	松江区疏影路1315号	7688.64	0.31	7	15.00	1.03	0.17	0.0725	3	是
	备选点3	闵行区申南路354号	3137.75	0.71	6	24.00	1.00	0.46	0.1442	1	是
	备选点4	闵行区元电路	3092.15	1.30	6	26.00	1.41	0.25	0.0454	4	否
区域二	备选点1	徐汇区斜土路2181号	22829.24	0.01	9	17.00	0.36	1.90	0.3015	2	是
	备选点2	徐汇区岳阳路281号	22586.94	0.18	8	15.00	0.31	2.10	0.2152	5	否
	备选点3	黄浦区长乐路318号	25055.84	0.33	11	11.00	0.49	2.05	3.3900	1	是
	备选点4	黄浦区复兴中路467号	58788.71	0.14	5	16.00	0.27	2.70	0.2612	4	是
	备选点5	长宁区平武路38号	33286.36	0.27	7	10.00	0.27	2.05	0.0359	6	否
	备选点6	徐汇区襄阳南路242号	22586.94	0.11	8	16.00	0.16	2.50	0.2741	3	是
区域三	备选点1	静安区林陵路343号	31456.88	0.06	3	10.00	0.10	0.10	0.0296	5	否
	备选点2	宝山区大华三路25号	11220.76	0.56	7	15.00	0.21	0.27	8.5922	2	是
	备选点3	宝山区泰兴桥路	13851.33	0.15	3	11.00	0.35	0.06	1.7407	4	否
	备选点4	普陀区北石路440弄24号	28974.29	0.04	5	14.00	0.49	0.28	6.8811	3	是
	备选点5	静安区天目中路393号	39179.89	0.07	8	18.00	0.22	0.44	13.7324	1	是
区域四	备选点1	浦东新区北张家浜路	25847.81	0.33	4	10.00	0.51	0.10	0.0407	5	否
	备选点2	杨浦区双阳北路358号	18801.89	0.64	7	18.00	0.50	0.49	7.1870	3	是
	备选点3	浦东新区商城路	1834.33	0.36	8	22.00	0.16	1.04	10.7857	1	是
	备选点4	浦东新区御秀路	4234.47	0.67	10	17.00	1.09	0.49	6.2900	4	是
	备选点5	浦东新区德平路76弄4号	25687.91	0.48	8	20.00	0.17	0.14	8.9859	2	是

表 5 区域一内各医院到最终备选点的距离和时间

医院名称	到备选点1 的距离/ km	到备选点1 的平均时间/ min	到备选点1 的畅行时间/ min	到备选点2 的距离/ km	到备选点2 的平均时间/ min	到备选点2 的畅行时间/ min	到备选点3 的距离/ km	到备选点3 的平均时间/ min	到备选点3 的畅行时间/ min
复旦大学附属儿科医院	17.62	43	28	8.03	34	24	9.82	33	22
复旦大学附属华山医院	21.01	40	28	17.80	39	25	22.73	42	29
.....									
上海市闵行区中心医院	12.04	41	28	3.61	21	12	5.42	26	18
上海市松江区中心医院	12.31	45	31	19.21	47	31	25.41	51	35

表 6 区域二内各医院到最终备选点的距离和时间

医院名称	到备选 点1的 距离/ km	到备选 点1的 平均时间/ min	到备选 点1的 畅行时间/ min	到备选 点3的 距离/ km	到备选 点3的 平均时间/ min	到备选 点3的 畅行时间/ min	到备选 点4的 距离/ km	到备选 点4的 平均时间/ min	到备选 点4的 畅行时间/ min	到备选 点6的 距离/ km	到备选 点6的 平均时间/ min	到备选 点6的 畅行时间/ min
复旦大学附属儿科医院	1.91	13	7	3.70	22	14	3.62	18	11	1.82	13	8
复旦大学附属妇产科医院	5.40	24	18	3.63	14	10	2.02	13	9	3.92	23	17
.....												
上海中医药大学 附属龙华医院	2.73	14	10	6.71	17	14	5.50	15	11	4.11	23	16
上海中医药大学 附属曙光医院	6.34	27	19	2.02	12	9	1.84	11	8	3.14	18	14

为备选点5号，位于静安区天目中路393号；区域四（杨浦区、虹口区、浦东区）的医疗救援中心最优选址点为备选点5号，位于浦东新区德平路76弄4号。

（四）实验结果可行性分析

为了确保上述最优选址点相较于其他备选点的优越性，本文将对各子区域的最优点进行三个方面的可行性分析：首先，在交通方面，本文将与主干道距离、道路节点数和道路宽度作为选址因素考虑在内，同时考虑了不同时间段可能消耗的运输时间。这不仅可以保证交通的便利性，增加了运输路径的可选择性，还能够保证运输过程中的时效性，降低绕路或者堵车的风险，以最快的速度将救援物

资送至所需地点。其次，在位置方面，在子区域内进行独立选址，缩小了物资配送的范围，提高了配送效率。利用直线交点法，确保救援中心与医院的距离更近。将人口密度、与最近公安机构的距离和与最近河流水系的距离作为选址因素，使救援中心在能够满足群众需求的同时，也能保证所提供服务的安全性和有序性。最后，在成本方面，通过计算备选点的运输、低碳和晚到惩罚这三部分成本，选出最优点。一方面可以在这三部分中达到“均衡”状态，使得运输距离短、运输耗时少的同时，还能实现绿色低碳的目标，另一方面在日后落实建设运营时，能够减少开支，在满足人们需求的同时节约成本。

表 7 区域三内各医院到最终备选点的距离和时间

医院名称	到备选点2 的距离/ km	到备选点2 的平均时间/ min	到备选点2 的畅行时间/ min	到备选点4 的距离/ km	到备选点4 的平均时间/ min	到备选点4 的畅行时间/ min	到备选点5 的距离/ km	到备选点5 的平均时间/ min	到备选点5 的畅行时间/ min
复旦大学附属华山医院	8.62	48	32	7.42	40	27	6.02	21	15
复旦大学附属华山医院北院	11.20	37	25	20.30	37	27	20.04	35	25
.....									
上海中医医院	9.81	36	25	8.63	41	27	3.34	15	11
上海交通大学医学院 附属瑞金医院	20.51	51	35	22.53	48	34	28.21	54	39

表 8 区域四内各医院到最终备选点的距离和时间

医院名称	到备选 点2的 距离/ km	到备选 点2的 平均时间/ min	到备选 点2的 畅行时间/ min	到备选 点3的 距离/ km	到备选 点3的 平均时间/ min	到备选 点3的 畅行时间/ min	到备选 点4的 距离/ km	到备选 点4的 平均时间/ min	到备选 点4的 畅行时间/ min	到备选 点5的 距离/ km	到备选 点5的 平均时间/ min	到备选 点5的 畅行时间/ min
复旦大学附属妇产科医院	5.23	29	21	4.72	20	16	17.52	43	30	6.13	24	16
复旦大学附属华山医院	12.14	34	23	7.90	25	19	13.02	32	23	5.01	22	16
.....												
上海中医药大学 附属曙光医院	15.61	41	27	11.20	31	21	6.61	24	17	9.11	28	19
复旦大学附属肿瘤医院	24.22	46	33	19.61	37	27	8.01	28	20	17.72	34	25

表 9 各区域医院到备选点的成本

区域	备选点	备选点位置	运输成本/元	碳排放成本/元	晚到惩罚成本/元	总成本/元	是否为最优选址点
区域一	备选点1	松江区新蟠路	771.29	49.90	2190.00	3011.19	否
	备选点2	松江区疏影路1315号	676.42	43.76	2090.00	2810.18	否
	备选点3	闵行区申南路354号	700.92	45.35	1770.00	2516.27	是
区域二	备选点1	徐汇区斜土路2181号	257.90	16.69	1410.00	1684.59	否
	备选点3	黄浦区长乐路318号	267.93	17.33	1140.00	1425.26	是
	备选点4	黄浦区复兴中路467号	272.07	17.60	1280.00	1637.42	否
	备选点6	徐汇区襄阳南路242号	230.36	14.90	1350.00	1569.67	否
区域三	备选点2	宝山区大华三路25号	517.27	33.47	2180.00	2730.74	否
	备选点4	普陀区北石路440弄24号	596.71	38.61	2110.00	2745.32	否
	备选点5	静安区天目中路393号	505.27	32.69	1480.00	2017.96	是
区域四	备选点2	杨浦区双阳北路358号	1070.62	69.27	3290.00	4429.89	否
	备选点3	浦东新区商城路	941.97	60.94	3190.00	4192.91	否
	备选点4	浦东新区御秀路	1371.77	88.75	3980.00	5440.52	否
	备选点5	浦东新区德平路76弄4号	942.64	60.99	2980.00	3983.63	是

六、结论

上海市三级医院主要分布在市中心位置, 周边行政区域的医疗资源相对匮乏, 一旦发生紧急情况时, 医院容量的有限性就难以保证为所有群众提供救治能力。因此在医院之外建立医疗救援中心, 为轻症患者提供救援帮助是很有必要的。本文主要针对从医院出发, 向救援中心提供医疗物资和服务的过程中的成本问题, 同时满足低碳原则。

为了尽可能减少医院到救援中的距离, 保证医院遵循“就近原则”提供服务, 本文将上海划分为四个子区域, 每个区域进行独立选址, 互不干扰, 最大程度提高服务效率。同时, 为了保证选址的有效性和精确性, 本文建立了三层选址流程模型, 在每个区域确定了一个最优选址点, 实现了救援中心能为一定范围内居民提供医疗资源的目标, 研究结果可为上海市后续的救援中心选址问题提供参考。

参考文献

- [1] 陈业华, 白静, 李兴源. 多阶段灾后救援选址-路径模型及求解算法[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(5): 150-157.
- [2] 赵江利. 基于改进蚁群算法的低碳物流配送中心优化选址系统设计[J]. *现代电子技术*, 2021, 44(13): 96-100.
- [3] 孙硕, 孟晗, 马良. 应急救援中心的选址-调度的双层模型及混合嵌套式算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2022,

43(2): 328-336.

[4] 许伦辉, 曹宇超, 林培群. 基于融合免疫优化和遗传算法的多应急物资中心选址与调度[J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2020, 38(6): 1-13.

[5] 孙强. 带时间窗的突发灾害应急物流中心选址研究[J]. *武汉理工大学学报:信息与管理工程版*, 2017, 39(1): 1-5.

[6] 王付宇, 叶春明. 基于改进萤火虫算法的应急救援中心选址[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(3): 1-5.

[7] 胡大伟, 成清, 胡卉, 等. 基于低碳视角的两阶段开放式选址路径问题——燃油车与电动车对比[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(12): 3230-3242.

[8] 蒋海青, 赵燕伟, 徐兆军. 低碳动态开放式选址-路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(9): 2365-2377.

[9] 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.

[10] ZHANG S, CHEN N, SHE N, et al. Location optimization of a competitive distribution center for urban cold chain logistics in terms of low-carbon emissions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 154(9): 107120.

[11] ZONOUZI M N, KARGARI M. Modeling uncertainties based on data mining approach in emergency service resource allocation-science direct[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 145(1): 106485.

[12] 杜浩国, 林旭川, 张方浩. 基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(2): 89-101.

[13] 张昕怡, 安睿, 刘艳芳. 武汉市急救资源可达性分析及站点优化选址[J]. *南京师大学报:自然科学版*, 2022, 45(1): 49-54.

[14] 吴欣. 考虑实时拥堵指数和时间窗的多目标冷链物流配送路径优化[J]. *价值工程*, 2020, 9: 131-133.

Machine Learning-Based Location for Medical Rescue Centers from the Perspective of Low-Carbon

PENG Shu-yue LIU Qin-ming LI Jia-xiang

(University of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093 China)

Abstract Since the injured can't get timely rescue when they suffer from sudden disasters, a location model of emergency medical rescue centers from the perspective of low-carbon is proposed, focusing on the distance and time of transporting medical supplies from hospitals to rescue centers. First, taking Shanghai as an example, the K-means clustering algorithm based on machine learning divides Shanghai into four sub-regions, and the straight-line connection method is used to determine the initial alternative sites of each sub-region. Secondly, the entropy weighting method is used to select several final alternative sites from the initial alternative sites in each sub-region. Finally, by considering the transportation cost, carbon emission cost and late arrival penalty cost, the total cost of all hospitals in each sub-region to the rescue center is calculated, and the site with the minimum total cost is determined as the optimal location site of each sub-region, to ensure that each hospital can provide medical resources to the nearest rescue center. Through the feasibility analysis of the optimal location site, the research result can be used as a reference for subsequent medical rescue center location in Shanghai.

Key words medical rescue center location; machine learning; entropy method; cost of carbon emissions; late arrival penalty cost

编辑 蒋晓