

武汉市急救资源可达性分析及站点优化选址

张昕怡, 安 睿, 刘艳芳

(武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

[摘要] 院前急救是直接连接医院和事故发生现场的紧急措施,及时高效的急救资源直接保障人民生命安全. 现有研究多基于站点讨论急救资源的空间可达性,较少关注站点分布的公平性和选址问题. 本文以社区为单元,使用考虑供需特征的改进两步移动搜索法分析当前武汉市社区急救资源的可达性和站点服务效率,并考虑站点分布的公平性实施优化选址. 实验结果表明站点密集地区受高急救需求的影响,实际服务效率较低,急救资源可达性也较低;站点稀疏地区急救需求相对低,此时空间距离直接决定急救资源可达性高低. 进一步识别可达性较低的冷点区域,提取其中具备潜在急救能力的 9 个二级以上医院作为待选点,逐一对比新增站点后急救资源的服务效率和公平性,得出实验中的 8 号待选点(洪山区东湖东路的东湖医院)最优,可视化对比证明增加该站点后急救资源可达性和急救系统服务能力均明显提升. 研究结果将为武汉市急救站点建设提供实证参考.

[关键词] 急救站点,改进两步移动搜索法,可达性,服务效率,公平性,优化选址

[中图分类号] R197.61 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2022)01-0049-06

First Aid Resources Accessibility Analysis and Site Location Optimization in Wuhan

Zhang Xinyi, An Rui, Liu Yanfang

(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Pre-hospital first aid is an emergency measure directly linking the hospital and the accident site, and timely and efficient first aid resources directly protect the safety of people's lives. Existing studies are mostly based on sites discussing the first aid resources spatial accessibility, and pay less attention to the fairness of site distribution and site location. In this paper, taking the community as the unit, the improved two-step floating catchment area method considering the characteristics of supply and demand is used to analyze the first aid sites service efficiency and community first aid resources accessibility currently in Wuhan, and comprehensively consider the fairness of the site distribution to optimize the site location. The experimental results show that the current site-intensive areas are affected by high first aid demand, the actual sites service efficiency is low, and the first aid resources accessibility is also low; the demand for first aid in sparse site areas is relatively low, and the spatial distance to the existing site directly determines the first aid resources accessibility. This paper further identifies the cold point area with low accessibility, extracts 9 secondary above hospitals with potential emergency capabilities as the points to be selected, compares the service efficiency and fairness of the first aid resources after adding the new sites one by one, and concludes that the 8th selection point (East Lake Hospital on East Lake East Road in Hongshan District) in the experiment is the best. Visual comparison proves that the first aid resources accessibility and the service capabilities of the emergency system are significantly improved after adding this site. The research results will provide an empirical reference for the construction of first aid sites in Wuhan.

Key words: first aid sites, improved two-step floating catchment area method, accessibility, service efficiency, fairness, location optimization

急救系统是社会应急安全保障的重要部分,是医疗服务体系确保人民群众生命安全的重要防线之一. 急救站点作为应急医疗的主要载体,是直达突发公共事件的前沿阵地. 当前有关急救资源的研究主要集中在急救资源配置评价和站点优化选址两方面:(1)急救站点可达性是现状下医疗急救资源配置好坏的重要判别指标,包括区域内站点的覆盖能力和人群对该设施的需求量^[1];(2)合理的新站点建设是对现

收稿日期:2021-10-28.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503601).

通讯作者:刘艳芳,博士,教授,博士生导师,研究方向:区域规划、经济地理、地理信息应用工程. E-mail: yfliu610@163.com

有急救体系的直接补充,有助于缩短救治半径、优化资源配置、减少时间成本。

资源配置问题常以设施是否可达作为主要研究方向。部分研究从设施的供给能力出发衡量可达性,基于缓冲区分析法^[2]、重力模型法^[3]、网络分析法^[4]等讨论公园绿地^[5]、教育^[6]、医疗^[7]等公共设施的服务范围、能力和覆盖人口数;部分研究从人口对设施的可获性出发衡量可达性,基于最小距离法^[8]等关注不同地域居民^[9]尤其是弱势群体^[10]可以获得公共资源的最近距离、数量和质量。近来,随着引力势能法^[11]和两步移动搜索法^[12]的兴起,研究者认为设施的实际可达性不仅与站点的供给能力有关,还受制于人群需求量的多少,即应综合设施的供求关系。其中两步移动搜索法相对客观简便,使用更为广泛。传统的两步移动搜索法^[13]默认所有站点等权重,未考虑设施可达性会随着出行距离的改变而衰减的问题,本文选用了以高斯函数作为距离衰减函数的改进两步移动搜索法^[14]。在评价急救资源配置现状的基础上,基于网络模型等讨论站点优化选址问题同样是研究热点;徐逸君^[15]分析了上海院前急救服务的供需现状,并结合网络结构进行站点优化;苏强等^[16]在考虑急救需求空间随机性的基础上,提出了采用高斯混合模型的分布特征描述方法和站点选址聚类方法;靳益宁^[17]引入时间满意度函数,结合P-中值模型构建了城市急救设施的多目标选址模型。总体上,急救站点的选址是典型的离散选址问题^[18],常用方法包括覆盖模型^[19]、P-中心模型^[20]、P-中值模型^[21]、分层选址模型^[22]和多目标选址模型^[23]等。但是,这些研究多以增大站点覆盖面积为目标函数,未考虑站点面对需求时实际的服务效率^[24-25]。此外,急救资源配置的公平性日益成为人群关注重点^[26]。例如:张新秀等^[27]对兰州市主要医疗站点服务能力进行分等级判别空间差异;张宸等^[28]应用空间自相关模型分析南京市社区获取急救设施的均等性;孙一璠等^[29]使用K-means算法讨论急救站点布局公平性。

综上所述,本文以武汉市主城区为研究对象,以社区为研究单元,统计2017年各单元急救呼叫发起量,使用改进两步移动搜索法,同时考虑急救站点供给和急救呼叫需求,可视化分析各社区的急救设施可达性和各个站点的实际服务效率;并使用空间自相关模型识别潜在的可达性低值聚集区,根据《武汉市加强院前急救体系建设的通知》^[30]“市急救中心可以依托二级以上医疗机构完善中心城区急救站点布局”,在冷点区内筛选拥有急救资质的二级以上医院作为新站备选点;计算社区可达性的基尼系数,将其作为公平性指标,对比各备选点单独加入当前急救体系后对各站点服务效率的提升和整体公平性的贡献,使用四象限图寻找站点效率和社区间公平双目标综合效益最大的备选点作为最适选址,并可视化加入该站点后急救系统的可达性变化,以期为卫生行政部门提供急救资源现状评估结果,对急救系统高效公平发展提供帮助。

1 数据收集与处理

1.1 研究区域

武汉市是湖北省省会,常住人口近千万。根据《2017年武汉市卫生健康事业发展简报》,武汉市共有各级医疗卫生机构6071家,其中医院354个,包含综合医院187个。武汉市政府关注院前急救服务水平和应急救援能力,致力于形成综合组织、指挥和调度的急救站点网络,以保障公民的生命安全和身体健康。截至2017年底,主城区内投入使用的急救站点共计52个,但需要提供急救支持的周边社区共计186个。现有急救站点分布是否可以合理匹配各社区潜在的急救需求,有待进一步讨论。

1.2 数据来源及处理

本文搜集了武汉市急救中心提供的2017年120急救电话接入数据,该数据记录了急救中心单日内接收到急救呼叫的经纬度坐标和病例类型,以社区为单元统计当年急救呼叫总数。急救站数据包含站点名称和经纬度坐标,基于ArcGIS空间化后进行坐标纠偏,保留了主城区内现有站点。在高德地图中爬取综合医院并保留二级以上医疗机构(《武汉市院前医疗急救条例》规定二级以上医院才具有院前急救资质,同一医院不同院区予以保留,非正常营业则删去)。最后,对武汉市测绘研究院提供的城市主次支路网进行拓扑检查和修改后构建道路网络数据集。

2 研究方法

2.1 基于改进两步移动搜索法的可达性分析

两步移动搜索法最早由Radke等提出,该方法同时考虑了供给和需求的影响因素^[31];Dai^[32]在计算

绿地可达性时首次引入高斯函数作为距离衰减函数,比较符合居民使用公共设施的实际情况.改进两步移动搜索法具体计算方法如下:

第一步:计算供需比,每个急救站点的供应能力除以各自搜索范围的急救需求数量,作为该站点的服务效率.本文站点服务效率表示该站点在规定搜索条件的限制下满足该搜索范围内急救需求的程度.站点的服务效率高,表示该站点在很大程度上可以满足周围区域的急救需求,同时也表明站点的压力相对较小;相反,站点的服务效率低,表示该站点相对不能满足周围区域的急救需求,处于高负荷运转状态,站点的压力较大.计算公式如下:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} G(d_{kj}, d_0) D_k}, \quad (1)$$

$$G(d_{kj}, d_0) = \begin{cases} \frac{e^{-(1/2) \times (d_{kj}/d_0)^2} - e^{-1/2}}{1 - e^{-1/2}}, & d_{kj} \leq d_0, \\ 0, & d_{kj} > d_0. \end{cases} \quad (2)$$

第二步:计算各个社区在其搜索范围内的急救站点的供需比之和,作为该社区的急救资源可达性.可达性越大,表示该社区获取急救资源的能力越强.计算公式如下:

$$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq d_0\}} \frac{S_j G(d_{ij}, d_0)}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} G(d_{kj}, d_0) D_k}. \quad (3)$$

式中, d_{kj} 为急救站点 j 和社区中心点 k 的距离, D_k 为搜索区内社区中心点 k 所代表的该社区的急救需求量, $G(d_{kj}, d_0)$ 为距离衰减函数, $G(d_{kj}, d_0) D_k$ 为加权的急救需求量, S_j 为急救站点 j 的供应能力. d_{ij} 表示社区中心点 i 和急救站点 j 的距离, R_j 为急救站点 j 搜索区域内的供需比, A_i 为每个社区 i 距离阈值 d_0 搜索区内衰减距离加权的供需比 R_j 之和.

本文在使用上述方法时不考虑各急救站点间的设备和人员差异,即默认供给方的供应能力相同.根据《武汉市加强院前急救体系建设的通知》,到2025年,武汉市城区打造“10 min 急救圈”,平均服务半径 ≤ 5 km,因此本文选取 5 km 作为搜索半径,以现有的急救站点作为供给方,以社区中心点作为需求方,使用改进后的两步移动搜索法计算武汉市社区尺度的急救可达性现状和各个急救站点的服务效率.

2.2 效率公平视角下的优化选址

基尼系数^[33]是经济学范畴中常用来衡量国家或地区居民收入差距的指标,各类公平性研究具有相似的内涵,因此基尼系数常用于其他领域的公平性研究中.基尼系数的公式如下:

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} W_i + 1 \right), \quad (4)$$

式中, G 为基尼系数, n 为社区个数, i 代表第 i 个社区, W_i 表示从第 1 组累计到第 i 组的人口总收入占全部人口总收入的百分比.基尼系数的值在 0~1 之间,数值越低,表明社会资源在研究对象间分布越均匀.

3 结果与讨论

3.1 社区急救现状分析

武汉市主城区的急救站点沿长江呈条带状分布.其中站点密度最大的区域分布于汉口的江岸区与江汉区,该地区商业发达,人口稠密,医院分布集中,且老龄人口比例更大;站点分布较少的区域多为主城区边缘或者主城区内部有水域覆盖的区域.统计各个社区的急救需求数量,根据社区面积计算得出各个社区的急救需求密度,采用自然断点法将需求密度分为 5 级,高需求密度区集聚在江汉区和江岸区,需求密度自此向四周递减,呈圈层式分布.

总体上,急救站点高密度区域的急救需求人口同时较高,这虽然反映了武汉市在对于急救站点的规划建设时优先考虑了市中心需求密度大的区域,但尚不清楚各区域内现有急救站点密度是否能满足当前的公众需求,同时地处偏远的辖区内居民的急救资源尚有缺乏.因此考虑武汉市主城区的急救供需情况是必要的,对此本文引入改进两步移动搜索法进一步评估急救站点密度和社区急救需求的匹配度.

3.2 急救站点服务效率和社区急救资源可达性分析

利用式(1)–(3)将站点数量、各社区急救需求人数和路径矩阵作为输入,计算得出武汉市主城区急救站点服务效率及社区急救资源可达性情况,使用自然断点法对结果进行可视化,如图 1 所示. 武汉市主城区服务效率高的急救站点有 2 个,占比相对较小,且位置分布于急救需求量较小的主城区边缘;服务效率低的站点有 22 个,且位置多分布于长江两岸人口稠密的江岸区、江汉区和武昌区等. 社区急救资源可达性高的社区共有 9 个,覆盖面积占比相对较小,且位置分布于急救需求量较小的主城区北部;社区急救资源可达性低的社区共有 64 个,多分布于主城区边缘地带和水域覆盖的东南部.

如图 1 所示,急救需求密度较小的区域,虽然分布的站点数量少,但是社区的急救需求极易被满足,社区急救资源可达性反而相对较高;同时对于急救需求密度较大的区域,尽管站点密度大,社区的急救需求只能在一定程度上被满足,社区急救资源可达性情况整体处于中间状态;当急救需求密度较小的区域,如果因为地处偏僻而完全没有站点分布,其急救需求完全不能被满足时,社区急救资源可达性就会相对很低.

上述分析进一步指向,社区急救资源可达性与其辖区内的急救需求数量、周围站点的分布情况及其自身所处的位置都有关系;而站点的服务效率也不完全和站点分布的集中程度有关,和周围社区的急救需求数量也有很大的相关性. 这体现了改进两步移动搜索法在深刻挖掘供需关系上的优越性.

对急救站点服务效率和社区急救资源可达性分布进行热点分析,如图 2 所示. 社区急救资源可达性的冷点区域分布在武汉市主城区的东北角和西南角及水域覆盖的东南角;热点区域分布在主城区北部、东北部和西南部;无显著性区域分布于城市中部. 研究范围东部冷热点变化明显,与东北部社区急救需求量小且东南部地区有大片水域覆盖相关. 急救站点服务效率的冷点区域分布在武汉市主城区的西北部,即江岸区和江汉区;热点区域分布与社区急救资源可达性的热点区域基本重合;无显著性区域分布面积较大.

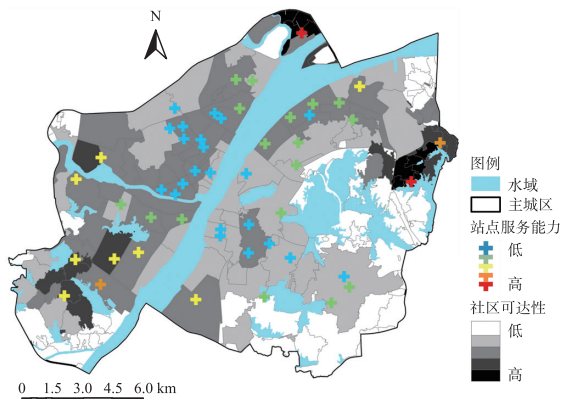


图 1 急救站点服务效率及社区急救资源可达性分布
Fig. 1 Distribution of first aid sites service efficiency and community first aid resources accessibility

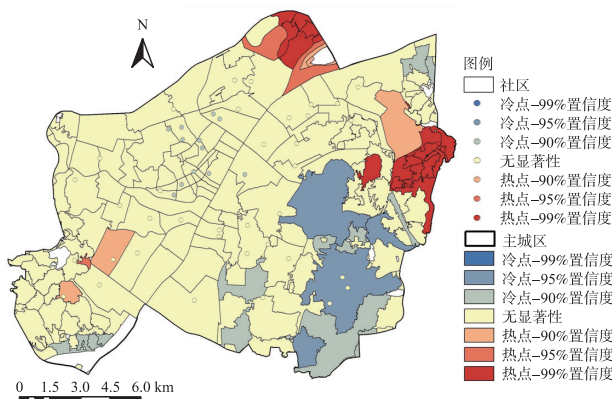


图 2 急救站点服务效率及社区急救资源可达性热点分析
Fig. 2 Hot spot analysis of first aid sites service efficiency and community first aid resources accessibility

3.3 待选点对比分析

在选择待选点时,如果以整个研究区为范围,新站点为缓解高需求区的站点压力,会被设置在站点密度已经很高的区域,导致社区间急救资源可达性的差距进一步增大. 为解决此问题,本文根据计算出的各个社区的可达性,使用自然断点法筛选出低可达性的区域,并与热点分析的冷热点交错区相叠加,得到需要增加站点的区域. 如图 3 所示,本研究重点关注可达性冷点区域,将其与爬取的二级以上医院叠加,得到本实验所需的 9 个待选点. 依次加入现有急救系统后,对急救系统的整体服务效率和社区急救资源可达性进行再计算,同时计算基尼系数以代表新增急救站点后资源配置的公平性. 所

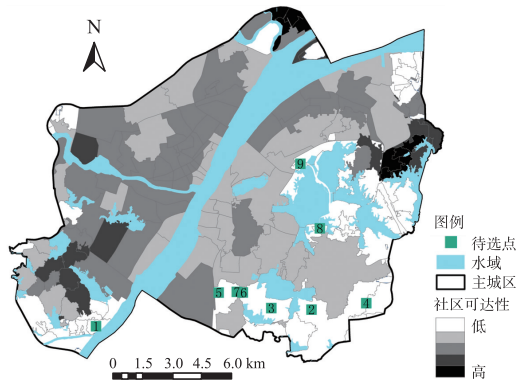


图 3 待选点分布图
Fig. 3 Distribution of the points to be selected

得结果如表 1 所示,加入待选点后服务效率提升较多的是 1 号、2 号和 8 号待选点,公平性提升较多的是 8 号和 4 号待选点.

表 1 待选点服务效率和社区急救资源可达性基尼系数

Table 1 Service efficiency at the points to be selected and Gini coefficients for community first aid resources accessibility				
序号	待选点服务效率	社区急救资源可达性基尼系数	挂靠医院	所在街道
1	3.84×10^{-3}	0.567 0	汉纸医院	蔡甸区沌口街道
2	8.93×10^{-3}	0.566 9	中南财经政法大学医院	江夏区关山街道
3	7.51×10^{-4}	0.556 2	华中农业大学医院	洪山区狮子山街道
4	1.30×10^{-3}	0.550 1	关东普度医院	江夏区关东街道
5	5.50×10^{-4}	0.561 9	首义学院医院	洪山区狮子山街道
6	3.67×10^{-4}	0.562 4	南大门综合医院	洪山区洪山街道
7	4.09×10^{-4}	0.562 0	甘霖澜湖医院	洪山区狮子山街道
8	1.62×10^{-3}	0.549 9	东湖医院	洪山区东湖风景区街道
9	3.16×10^{-4}	0.564 9	华中科技大学同济医学院附属梨园医院	武昌区东湖风景区街道

3.3.1 四象限法筛选最优选址

将待选点服务效率和社区急救资源可达性基尼系数的计算结果绘制成散点图,根据散点图上各点的分布情况,选择最优的急救站点选址. 图 4 中可以明显看出,当以效率目标为首要条件时,2 号待选点的横坐标最大,因此是最优的选址;而 8 号待选点和 4 号待选点在优先考虑公平性的条件下,也是较为合理的选择. 根据四象限散点图及基尼系数的性质可得,第四象限的点应为满足研究条件的最优点. 但是目前的待选点并没有满足要求的选址,因此进行进一步的筛选.

3.3.2 等权重赋值法筛选最优选址

本文对不同条件下的 3 个最优点公平和效率指数等权重赋值,计算得出 2 号、4 号和 8 号待选点的效率-公平综合评价指数分别为 0.502 5、0.550 7 和 0.575 5,8 号待选点最优. 该点可有效提升站点整体的服务效率和社区急救资源的公平性. 如图 5 所示,加入 8 号站点后,站点周围区域如狮子山街、珞珈山街、磨山村、桥梁村等可达性明显提升;新增站点东湖医院的站点服务能力处于中等偏高的状态,它在充分满足周围社区急救需求的同时运行压力不大. 综上所述,洪山区东湖东路的东湖医院是武汉市新建急救站点的最佳选址.

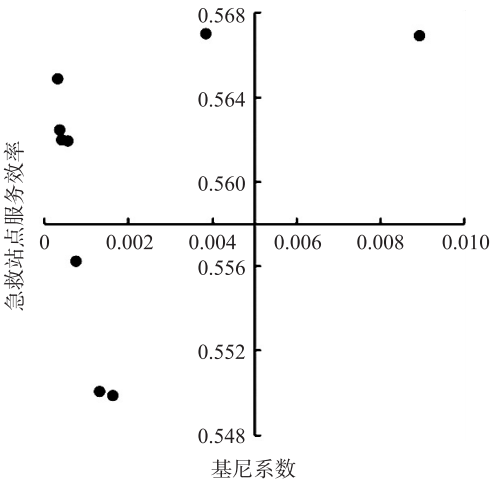


图 4 待选点指标散点图
Fig. 4 Scatter chart of the indicator of the points to be selected

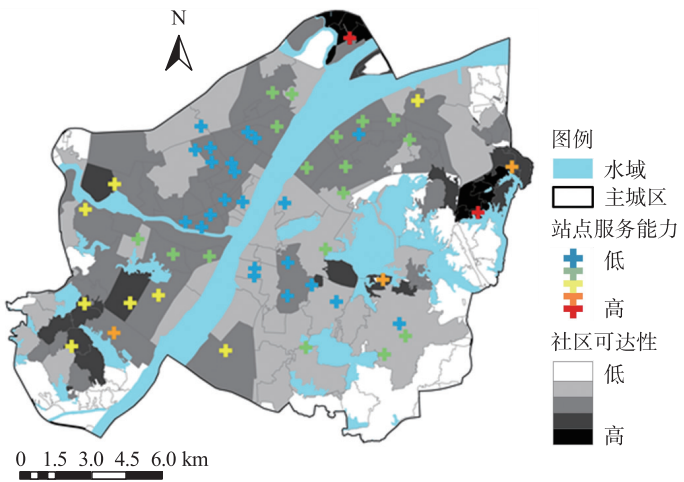


图 5 加入新站点后的急救站点服务效率及社区急救资源可达性分布
Fig. 5 Distribution of first aid sites service efficiency and community first aid resources accessibility after adding the new site

4 结论

武汉市主城区急救站点密度和急救需求人口数均呈现出以江汉区为高值聚集区向外围圈层式递减的分布特征. 当考虑供求关系时,急救需求量低的外围社区仅需要少量站点即可拥有较高的可达性;急救需求量大的社区虽然站点分布密集,但站点高压运行导致实际医疗资源可达性较低,应及时增加人员和设备投入以短期内提高站点的急救保障能力.

本文重点识别出存在急救需求却未被站点覆盖的冷点社区,这些地区急需新站点的建设,经过对比,确定新增东湖医院作为急救站点最优。新增站点服务能力处于中等偏高的状态,能明显提升周边区域的急救资源可达性,并对整体急救资源分配的公平性具有正向作用。研究结果可对武汉市后续急救站点的建设提供实证参考。

[参考文献]

- [1] 张志斌,张翠翠. 区域与城市内部可达性及其应用研究综述[J]. 开发研究,2016(3):33-38.
- [2] 施拓,李俊英,李英,等. 沈阳市城市公园绿地可达性分析[J]. 生态学杂志,2016,35(5):1345-1350.
- [3] 刘良硕. 基于重力模型的岛礁及港口的可达性模型研究[D]. 青岛:山东科技大学,2020.
- [4] 吴红波,郭敏,杨肖肖. 基于GIS网络分析的城市公交车路网可达性[J]. 北京交通大学学报,2021,45(1):70-77.
- [5] DAI D J. Racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban green space accessibility: where to intervene? [J]. Landscape and urban planning, 2011, 102(4): 234-244.
- [6] 刘科伟,史茹,康智渊. 基于供需关系的城市边缘区基础教育设施布局研究——以西安市长安区韦曲街道为例[J]. 地域研究与开发,2018,37(5):83-88.
- [7] 吴玲玲,黄正东,江海燕,等. 公共交通网络下的城市中低收入人群就业可达性研究[J]. 城市发展研究,2018,25(8):117-124.
- [8] 白永平,张文娟,王治国. 基于POI数据的医药零售店分布特征及可达性——以兰州市为例[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2020,36(1):77-83.
- [9] 申悦,李亮. 年龄分层视角下医疗设施可达性对居民就医行为的影响——以上海市崇明岛为例[J]. 人文地理,2021,36(2):46-54.
- [10] 周立. 常州市残疾人口的空间分布特征及其公共服务资源点的可达性研究[D]. 上海:上海师范大学,2021.
- [11] 董小刚. 基于改进可达性模型的住宅价格影响因素研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2020.
- [12] LUO W, QI Y. An enhanced two step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians[J]. Health and place, 2009, 15(4): 1100-1107.
- [13] 赵红洋,黄秋兰,徐斌,等. 基于两步移动搜索法的南宁市卫生应急资源空间可达性研究[J]. 医学动物防制,2019,35(2):166-171.
- [14] 车莲鸿. 基于高斯两步移动搜索法空间可达性模型的医院布局评价[J]. 中国医院管理,2014,34(2):31-33.
- [15] 徐逸君. 上海院前急救医疗资源配置研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2012.
- [16] 苏强,杨微,王秋根. 考虑空间随机需求的急救站点选址规划[J]. 中国管理科学,2019,27(10):110-119.
- [17] 靳益宁. 考虑时间损失的城市应急医疗设施布局优化[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
- [18] 曹琦,陈闻轩. 应急设施选址问题研究综述[J]. 计算机工程,2019,45(12):26-37.
- [19] 施从金. 基于覆盖模型的社区卫生服务中心选址研究[D]. 南昌:江西财经大学,2021.
- [20] AMIT K, JON K. Fairness measures for resource allocation [J]. Proceedings of 41st IEEE symposium on foundations of computer science, 2000, 36(3): 75-85.
- [21] 刘璇. 基于GIS的物流配送中心选址方法的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [22] 周宇阳,张惠珍,马良. 求解应急医疗设施分层递进式选址问题的改进免疫算法[J]. 运筹学学报,2021,25(2):15-34.
- [23] 孙冉,张惠珍. 多目标双重覆盖下的急救中心选址及其狼群算法求解[J]. 科技和产业,2020,20(5):95-102,155.
- [24] 张文鑫. 灾害应急运作管理中公平目标评估和选址分配模型研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [25] 池婷. 结合效率评价的城市公共服务设施选址模型研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [26] 陈唯. 广东省院前急救资源配置现状及公平性分析[D]. 广州:暨南大学,2018.
- [27] 张新秀,程耀东,张志华. 基于GIS的城区急救中心空间分布合理性评价研究[J]. 应用科技,2014,41(1):43-47.
- [28] 张宸,翟志雯,李雅迪. 基于潜能模型的南京市中心城区急救医疗设施选址优化[J]. 江苏建筑,2019(200):79-83.
- [29] 孙一璠,赵明,刘泽彬,等. 急救站点布局合理性评价指标与实证研究[J]. 医学信息学杂志,2017,38(6):48-53.
- [30] 武汉市人民政府办公厅. 关于进一步加强全市院前急救体系建设的通知[Z]. 2021-05-19.
- [31] RADKE J, MU L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs [J]. Geographic information sciences, 2000, 6(2): 105-112.
- [32] DAI D J. Black residential segregation, disparities in spatial access to health care facilities, and late-stage breast cancer diagnosis in metropolitan Detroit [J]. Health and place, 2010, 16(5): 1038-1052.
- [33] 李廷. 中国医疗公平问题研究[D]. 济南:山东大学,2008.

[责任编辑:丁 蓉]