

基于交通网络模型的长沙市医疗急救空间结构特征分析及其优化策略

向汗杰

广西师范大学数学与统计学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月13日; 录用日期: 2026年7月5日; 发布日期: 2026年7月16日

摘要

本文以2024年长沙市中心城区的交通路网为基础, 构建交通网络分析模型, 通过对医疗急救站点的空间特征和服务分析, 揭示城市医疗急救空间结构的特征。首先, 论文利用基尼系数、差异系数等区域统计指标, 分析了医疗急救站点POI数据与人口数据的空间分布特征, 揭示了其高度集聚、区域发展不均衡的格局。其次, 通过构建交通网络模型, 采用两步移动搜索法和潜能模型评估了医疗急救服务的空间可达性, 识别出“核心-边缘”的空间分异格局和资源分布的不公平性。最后, 运用最大化覆盖范围模型和最小化设施点数模型等位置分配方法, 对现有急救站点的布局进行优化, 并得出结论: 为满足长沙市的医疗急救需求, 至少需要37个急救站点, 即在现有基础上需新增3个站点。本文对于特大型城市的医疗急救站点选址具有积极作用, 能识别出医疗急救站点选址的适宜区和医疗急救的空间格局特征, 并基于最大化覆盖范围模型和最小化设施点数模型优化医疗急救站点的服务能力, 满足研究区域的设施要求。

关键词

基尼系数, 可达性, 两步移动搜索法, 潜能模型, 位置分配模型

Analysis and Optimization Strategy of Spatial Structure Characteristics of Medical Emergency in Changsha Based on Transportation Network Model

Hanjie Xiang

School of Mathematics and Statistics, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Received: June 13, 2026; accepted: July 5, 2026; published: July 16, 2026

Abstract

Based on the traffic network of the central urban area of Changsha in 2024, this paper constructs a transportation network analysis model. By analyzing the spatial characteristics and service capacity of emergency medical sites, it explores the spatial structural features of urban emergency medical resources. Firstly, regional statistical indicators, including the Gini coefficient and coefficient of variation, are adopted to analyze the spatial distribution of POI data of emergency medical sites and population data, revealing a highly agglomerated and spatially unbalanced layout. Secondly, with the established transportation network model, the two-step floating catchment area (2SFCA) method and potential model are applied to evaluate the spatial accessibility of emergency medical services, identifying a “core-periphery” spatial differentiation pattern and inequitable resource allocation. Finally, location-allocation models, including the maximum coverage model and minimum facilities model, are used to optimize the existing layout of emergency stations. The results indicate that a minimum of 37 emergency stations is required to satisfy the emergency medical demands of Changsha, meaning three additional stations need to be built on the current basis. This research provides practical references for emergency medical site planning in megacities: it identifies suitable construction zones and spatial distribution patterns of emergency medical facilities, and optimizes service capacity via maximum coverage and minimum facilities models to match the facility demands of the study area.

Keywords

Gini Coefficient, Accessibility, Two-Step Floating Catchment Area, Potential Model, Location Allocation Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

(一) 背景

近年来我国医疗急救基础建设成效显著，但面对城市人口的不断增加造成的问题，如人口老龄化、交通事故和突发疾病等情况，医疗急救面临着快速城市化与突发健康事件等严峻挑战。根据国家卫健委于 2020 年发布的《关于进一步完善院前医疗急救服务的指导意见》[1]，其中明确要求医疗急救站点应该充分考虑城乡功能定位、人口规模及健康需求，构造以医疗急救中心为调度中心、大型医院为框架的急救车调度网络体系，实现调度效率、服务覆盖率和响应效率。但是目前的医疗急救仍存在以下问题：医疗急救站点网络体系建设不完善、医疗急救中心基础建设缺乏、救护车及医护设备缺失、医院急救队伍混乱、医护急救培训不足和急救工作不规范。根据卫健委建设目标要求，这些问题反映出国内的医疗急救工作仍存在改进工作。

在城市规划和医疗健康交叉领域，面对高致死率、不可预知性、突发性和时效性的综合性挑战，城市医疗急救服务具有鲜明发病急、救治急和患者转移运输急的特点，这意味着医疗急救站点的分配科学合理且具有及时性。但是在城市急救中，救护车常因人口密度高、城市道路复杂、需求不确定性高，使得医疗急救面对更高的要求，同时对于医疗急救站点分布资源的不均衡、急救服务范围重叠与缺失的情况，导致了城市医疗急救平均反应时间长，导致患者因为送医不及时而死亡的病例不断增加。《“健康

中国 2030”规划纲要》[2]提出：我国应该建立健全突发事件应急网络体系，到 2030 年，构建出覆盖面积全、应急流程完善的医疗急救网络，进一步健全医疗急救体系，提高医疗急救成功率。因此，医疗急救站点与急救车在交通路网可进行动态调配的功能下，如何优化医疗急救站点的合理布局与建设，在缩短急救时间和最大限度扩大急救站点覆盖范围，在提高急救病例上具有重要意义。

(二) 文献综述

随着城市规模扩大、交通路网复杂和人口密度持续攀升，空间立体化医疗急救服务已经成为医疗急救行业的新挑战。作为城市医疗急救服务的核心基础单元，医疗急救站点的规划选址需要体现公平性和均衡性，满足最大限度覆盖居民服务区域。因此，研究医疗急救站点的空间格局特征和分布形式规律、完善城市医疗急救站点协同优化技术，对提升城市医疗韧性与服务公平性具有重要的现实意义。目前，研究学者已从多维度开展医疗急救站点选址布局及优化策略的相关研究。

在急救站点选址与布局优化方法方面，刘敏[3]采取 AHP 方法对选址决策因素实现了急救站点选址模型的构建和优化，但是依赖于主观决策因素；周鑫鑫[4]融入量子进化机制来提升急救服务设施空间动态配置的求解，相对于传统的静态配置，显著提升了设施空间配置质量。韩冰[5]以区位理论作为基础，采用覆盖模型作为选址模型，将急救需求分布和交通动态纳入约束条件，弥补了布局选址未考虑路网状态的缺陷。苏强等人[6]应用高斯混合模型考虑时空随机性建立机会约束模型进行站点选址优化。刘宁等人[7]利用空间信息系统优化急救站空间网络布局，提高急救资源利用率。吴瑶[8]针对紧急医疗救援服务以改进的遗传算法设计了实时和时变结合的最短路径计算策略，优化了急救时间的决策效率。李建松等人[9]以多源数据从便利度、均等度、人口覆盖度和协调度出发测度了急救站点的空间分布特征，利用现有站点布局问题进行站点布局优化。

在可达性测度与公平性评价方面，李嘉磊等人[10]以黄金救援时间作为阈值构建了急救圈边界的动态性和时变性，突破了传统静态可达分析的局限。王馨恬[11]考虑三个救援特征研究了紧急救援系统及评价问题，解决了急救车辆闲置或无车问题。陈唯[12]根据经济、地理和急救模式用问卷方法对广东四城市进行定性访谈，利用基尼系数、泰尔指数和洛伦兹曲线得到了广东院前急救配置的不公平性。张新秀等人[13]采用缓冲区分析和叠置分析对兰州市主要医疗站点进行建模评价，结果显示医疗急救站点分布过于集中，分布不合理不公平。白盛男[14]以用户行为为切入点从服务设计出发，构建了医疗急救服务评价系统。张昕怡等人[15]以社区单元考虑供需特征的改进两步移动搜索法分析武汉市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。严可[16]从患者的需求、利用、资源分布三个方面讨论急救医疗服务的公平性，计算不同疾病死亡率的集中指数以及急诊利用率的集中指数，急救中心按人口和区域面积分布的基尼系数表示急救医疗资源分布的地区间公平性。

综上所述，现有研究在急救服务效率分析、站点选址优化、可达性测度、公平性评价以及动态建模等方面已取得丰硕成果，然而大多数研究只是从可达性评价或选址优化单一出发，对急救空间布局特征联合可达性评价研究相对薄弱，或者只是从决策因素出发，从定性角度刻画空间结构，缺乏基于本地交通路网的实证分析。本文以长沙市为研究区，构建基于实际路网的医疗急救空间网络模型，整合急救站点、居民需求点与路网数据，测度时空条件下的可达性评价与反应时间，运用网络分析与空间统计方法识别长沙市急救空间的核心结构特征，以期对急救站点的优化布局与资源配置提供决策参考。

2. 数据预处理

(一) 研究区概况

长沙市地处湘江下游和长浏盆地边缘，地形以平原和丘陵为主，地势南高北低，湘江穿城而过，将城区分为河东、河西两部分，截至 2024 年，长沙市下辖 6 个市辖区、1 个市下辖县和两个代管县级市，

本文选取岳麓区、天心区、雨花区、开福区和芙蓉区作为长沙市中心五城区，并以中心五城区 77 个街道社区为研究对象，其中 75 个街道乡镇和 2 个经济开发区。根据长沙市卫健委发布的统计信息，截至 2025 年，长沙市共有 6635 家医疗卫生机构，其中有 246 家医院，三级医院共有 41 家，全市医疗机构实际开放床位共有 8.64 万张，卫生技术人员共有 11.93 万人，其中执业医师有 4.66 万人，注册护士 5.62 万人，均超过国家标准。随着长株潭城市群的建设日益发达，长沙市出现了新的经济发达区域和人口密集区域，现有的医院布局 and 医疗急救站点布局不能很好地适应长沙市城市发展的速度，所以选定适宜长沙市城市发展的合理的医疗急救站点具有重要的意义。

(二) 数据说明

本文的研究数据主要分为路网数据、POI 数据、人口数据、医院病床数和医疗急救站点信息数据。长沙市道路数据是通过开放街道地图(OSM)获取街道网络数据，再对收集到的路网数据根据长沙市中心五城区进行筛选裁剪路网数据，这对构建交通网络模型和计算出行时间成本尤为重要；人口数据来源于 2020 年《长沙市人口普查年鉴》[17]；长沙市各医院病床数来源于各医院官网发布数据；长沙市医疗急救站点信息数据来源于长沙市 120 急救中心网站。

(三) 数据清洗

对收集到的道路数据和设施兴趣点 POI 数据进行清洗和预处理，包括去除重复值、标准化坐标系处理等。使用地理信息系统(ArcGIS)软件来处理数据，为构建交通路网模型提供技术支持。具体的数据处理过程如下：

1. 裁剪数据：对 OSM 收集到的数据，根据长沙市中心五城区的范围进行裁剪出长沙市中心五城区的道路数据；
2. 标准化坐标系：定义道路数据的投影为地理坐标系 WGS84，再用投影把道路数据转变为投影坐标系 xian1980；
3. 融合要素：将重复的道路线段融合为一条，并且保留道路的 fclass 属性，得到 16,820 条长沙市中心五城区道路数据；
4. 剪断要素：将融合后的数据在相交点处剪断，得到 53,688 条道路数据；
5. 得到长沙市中心城区道路数据如图 1 所示。

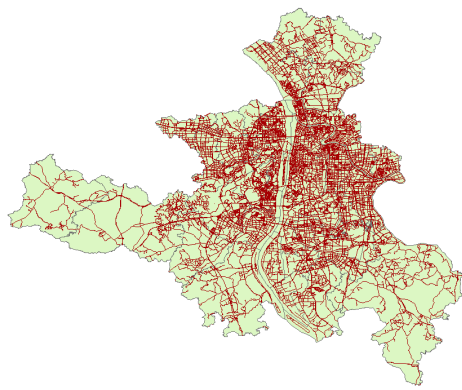


Figure 1. Road map of central urban area in Changsha City
图 1. 长沙市中心城区道路图^①

3. 长沙市医疗急救空间的区域统计

(一) 模型建立

根据长沙市中心城区行政区域将中心划分为 77 个研究区域, 长沙市医疗急救站点共有 39 个, 本文去除作为救护车调度中心的长沙市 120 急救中心直属站, 利用 38 个医疗急救站点构建分析长沙市医疗急救行业的区位类型及特征的基本框架, 在此基础上, 引入 3 个分析指标。

1. 基尼系数: 基尼系数的取值通常在 0~1 之间, 可以用来反映某地理要素在一定区域内的聚集程度, 数值越大代表聚集程度越高。利用该系数可以衡量医疗急救站点在长沙市中心区域内分布的聚集程度, 其计算公式为:

$$G = \frac{\sum |X_i - x|}{\sum X_i + (N-2)x}, \quad (1)$$

其中, G 表示基尼系数, X_i 表示第 i 个地区单元内的医疗急救站点数量, x 表示所有地区单元中医疗急救站点数量的平均密度, N 表示地区单元的总个数。

2. 带间差异系数: 带间差异系数可用来衡量地理事物在区域间的分布差异。这里用来反映医院在长沙市医疗急救站点分布的差异程度, 其计算公式为:

$$CV = \frac{\delta}{x}, \quad (2)$$

其中, CV 表示带间差异系数, δ 表示不同地域内医疗急救站点数量的标准差, x 表示不同地域内医疗急救站点数量的平均密度。

3. 别特化系数: 别特化系数在这里是指医疗急救站点数量的带内密度与全域密度的比值, 可用于衡量医疗急救站点数量在某个带内的相对聚集程度, 其计算公式为:

$$B_i = \frac{x_i}{x}, \quad (3)$$

其中, B_i 表示第 i 带的带别特化系数, x_i 表示第 i 区域内医疗急救站点数量的平均密度, x 表示全域中医疗急救站点数量的平均密度。

(二) 区位类型分析

首先将医疗急救站点位置信息导入 GIS 软件, 并按照每个医疗急救站点所属的医院的病床数进行权重, 将长沙市医疗急救站点在长沙市中心城区的地理分布情况进行可视化, 可视化结果如下图 2 所示。

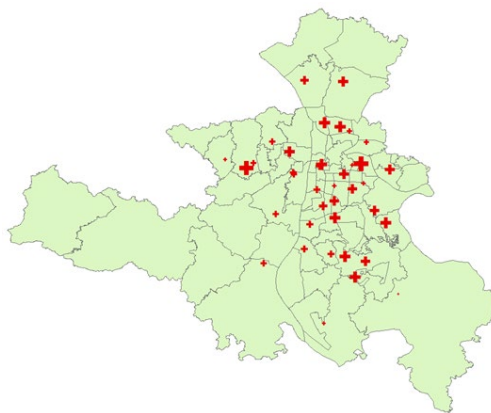


Figure 2. Geographic distribution of medical emergency sites in Changsha City

图 2. 长沙市医疗急救站点的地理分布^①

本文利用 GIS 软件将长沙市中心城区的医疗急救站点进行空间统计, 统计结果如下表 1 所示。

Table 1. Spatial statistics of medical emergency sites in central urban area of Changsha City
表 1. 长沙市中心城区医疗急救站点的空间统计

行政区域	计数项: 医疗急救站点	区域面积	设施密度	$\sum X_i - \bar{x} $	别特化系数
朝阳街街道	1	2.014715	49.63481	43.39601	7.955828
东岸街道	1	7.910104	12.64206	6.403261	2.026361
东山街道	1	11.38875	8.780596	2.541798	1.407418
东塘街道	1	2.39674	41.72335	35.48455	6.687722
东屯渡街道	1	2.251791	44.4091	38.1703	7.118214
洞井街道	3	37.37771	8.026173	1.787374	1.286493
芙蓉北路街道	1	5.735938	17.43394	11.19514	2.794439
高桥街道	1	5.523946	18.103	11.8642	2.901681
桂花坪街道	1	5.764325	17.34808	11.10929	2.780677
黑石铺街道	1	10.35198	9.659988	3.421189	1.548373
火星街道	2	1.143757	174.8623	168.6235	28.02821
桔子洲街道	1	10.34059	9.67063	3.431832	1.550079
捞刀河街道	1	34.58133	2.891733	3.347065	0.463508
黎托街道	1	18.36701	5.444543	0.794255	0.872691
浏阳河街道	2	5.986639	33.40772	27.16893	5.354833
麓谷街道	1	13.86303	7.213432	0.974634	1.156221
暮云街道	1	46.48928	2.151034	4.087765	0.344783
坪塘街道	1	90.59393	1.103827	5.134972	0.176929
砂子塘街道	1	2.452988	40.76661	34.52781	6.534369
天顶街道	2	22.4093	8.924868	2.686069	1.430543
跳马镇	1	176.1097	0.567828	5.67097	0.091016
望麓园街道	2	1.155671	173.0597	166.8209	27.73926
望岳街道	1	14.20622	7.039172	0.800373	1.12829
新开铺街道	1	6.148825	16.26327	10.02447	2.606795
秀峰街道	1	22.89025	4.368672	1.870126	0.700243
银盆岭街道	1	6.17662	16.19008	9.951285	2.595064
雨花亭街道	1	6.886117	14.52197	8.283174	2.327687
裕南街街道	1	3.023027	33.07943	26.84063	5.302212
月湖街道	1	6.612556	15.12274	8.883946	2.423984
岳麓街道	2	24.12277	8.290923	2.052124	1.328929
左家塘街道	1	4.816065	20.76384	14.52504	3.328179
总计	38	609.0916	823.4655	671.873	

由表 1 结果计算可知, 长沙市医疗急救站点的区位基尼系数为:

$$G = \frac{\sum |X_i - x|}{\sum X_i + (N-2)x} = \frac{671.873}{823.4655 + 29 * 671.873} = 0.668936,$$

同时带间差异系数为:

$$CV = \frac{\delta}{x} = \frac{40.89036057}{26.56340169} = 1.539349555$$

因为基尼系数为 0.668936, 其值大于 0.6, 说明长沙市医疗急救站点在中心城区呈现出高度集聚、空间分异特征显著, 差异系数为 1.539349555, 说明长沙市医疗急救站点区间差异显著, 医疗急救行业区域发展不均衡、区位分化明显, 由基尼系数和区间差异系数揭示了长沙市中心城区的医疗急救站点分布表现出整体高度集聚, 医疗急救行业区域差距极大, 其他区域表现出医疗急救行业的空心化。

4. 交通可达性评价

(一) 交通网络构建

首先设置速度和时间成本, 根据 2020 年长沙市交通状况年度报告, 长沙市城区晚高峰快速道路平均速度约 31 km/h, 主干路平均速度为 21 km/h。设置交通速度成本为 31 km/h。根据速度公式 $v = d/t$, v 为速度, d 为路程, t 为时间。

计算出交通网络的时间成本。然后在 GIS 软件里建立文件地理数据库, 再在地理数据库里新建要素数据集, 并在数据集中导入中心城区道路数据, 最后再在要素数据集上建立网络数据集, 得到长沙市交通网络模型图如图 3 所示。

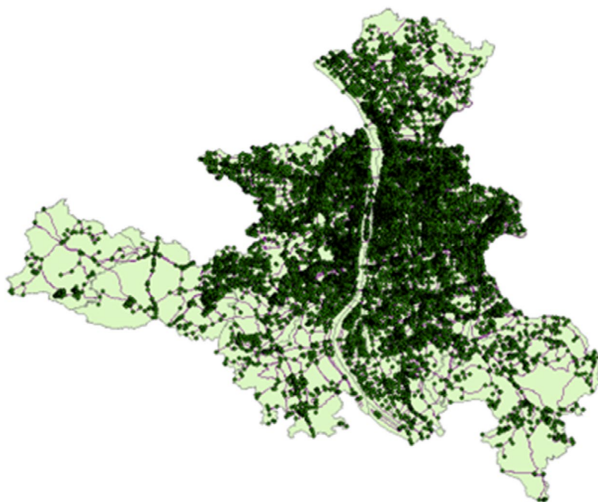


Figure 3. Traffic road network model map of central urban area in Changsha City

图 3. 长沙市中心城区交通路网模型图^①

(二) 最短路径分析

GIS 软件采用 Dijkstra 算法计算交通网络中的最短路径, 本文利用消防站点出行的驾驶时间作为计算成本选择时间成本最低的路径。利用 GIS 软件在构建的交通网络中以驾驶时间为成本进行最短路径分析, 首先添加医疗急救站点 1 号作为起始点和 2 号居民点停靠点, 可以得到基于驾驶时间的最短路径如图 4 所示。

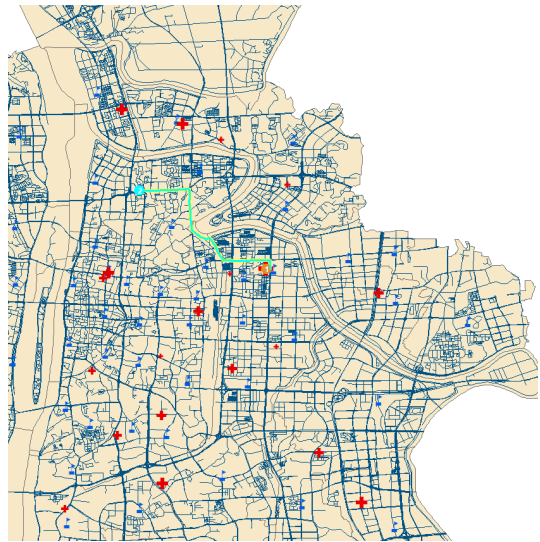


Figure 4. Shortest path between stop 1 and stop 2
图 4. 1 号和 2 号停靠点最短路径^①

(三) 数据预处理

在城市医疗急救站点的可达性分析方法上,借助长沙市中心城区的 77 个街道数据和每个街道数据相对应的人口数据,建立长沙市中心城区的乡镇街道居民点数据作为城市交通可达性的需求点数据,结合长沙市 120 急救网站给出的医疗急救站点作为供给点,采用两步移动搜索法,实现考虑城市人口密度分布的城市医疗急救站点的可达性分析。

首先,进行数据预处理,本文得到的长沙市乡镇街道行政区划和人口数据,没有具体的居民点,因此采用 GIS 软件里的面转点工具,将乡镇街道行政区划面数据转化为相对应的点数据,每个乡镇街道的居民数量作为属性值,得到医疗急救站点和居民数据点的地理分布情况,如图 5 所示。

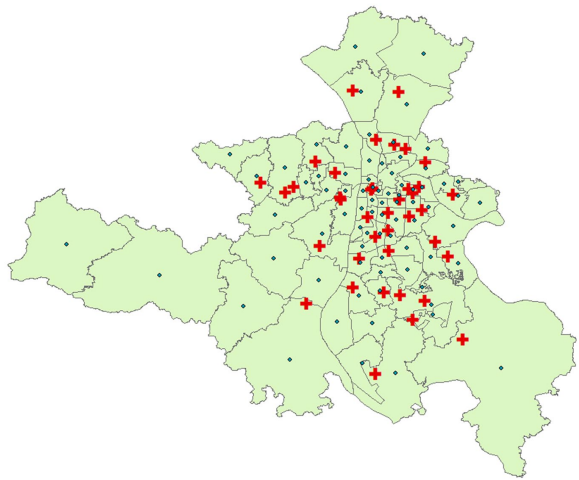


Figure 5. Distribution map of residential sites and emergency sites in the central urban area of Changsha City
图 5. 长沙市中心城区居民点和急救站点分布图^①

反距离权重法(IDW)是地理信息系统(GIS)中常用的空间插值方法,该方法基于地理学第一定律——距离越近,空间要素关联性越强、相似度越高的核心原理,利用已知离散样本点的数值,根据未知点与

样本点的空间距离赋予相应权重,进而推算未知栅格像元的数值,生成要素的连续空间分布图。其核心计算公式为:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}, \quad (4)$$

其中, Z 为未知点预测值, Z_i 为第 i 个已知样本点数值, d_i 为未知点与第 i 个已知样本点的空间距离, p 为距离幂次(常用取值为 2);在该方法中,未知点与已知样本点的距离越近,对应样本点的权重越大,对预测结果的影响越强。

为进一步研究长沙市中心城区的人口分布情况,本文采用反距离权重法,对长沙市中心城区居民数量进行处理,得到长沙市人口密度分布图如图 6 所示。

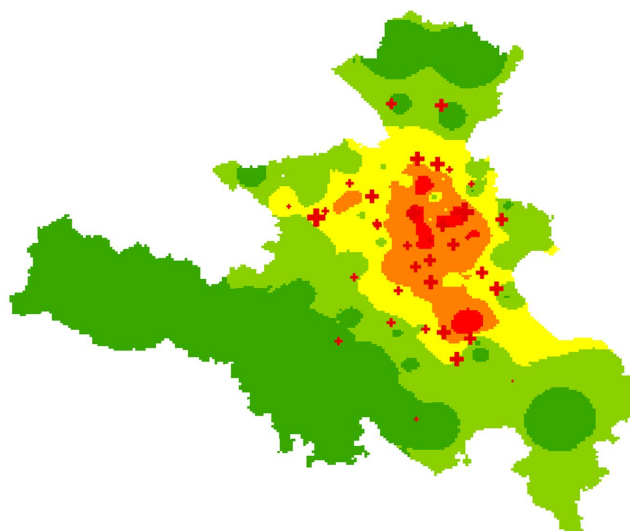


Figure 6. Population density distribution map of Changsha City
图 6. 长沙市人口密度分布图^①

由长沙市中心城区的人口密度分布图可得知,长沙市人口主要集中在湘江两岸和岳麓街道,在城市边缘的人口相较于湘江沿线的人口较为稀疏,因此在人口分布不均匀的地理特征下,优化医疗急救资源的分布特征很有必要。

(四) 两步移动搜索法

两步移动搜索法是城市公共服务设施空间交通可达性使用最广泛的方法,最早由 Radke 等提出,该方法综合考虑了供给和需求的影响因素,通过以供给点和需求点为基础进行搜索,计算供需比来对城市交通可达性进行评价。其计算过程如下:

步骤 1: 针对长沙市中心城区每个医疗急救站点 j , 以站点 j 为医疗急救中心,根据最短路径分析中的时间成本作为搜索阈值,得到搜索阈值范围内的需求点 k 的集合,并由此计算医疗急救站点 j 在此范围内的供需比 R_j , 计算公式如下所示:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{r=1,2,3,4} \sum_{j \in D_r} P_k}, \quad (5)$$

其中, S_j 表示急救站点的服务能力, 本文以急救医院的病床数作为医疗资源提供数量; P_k 表示医疗急救站点所能服务到的居民点的人口数量。

步骤 2: 对于长沙市中心城区每一个街道乡镇居民点作为需求点 i , 根据时间成本最短路径给定搜索阈值, 形成一个空间区域, 计算该区域内的所有急救站点的集合, 统计居民需求点 i 的供需比 R_j 的和, 计算公式如下所示:

$$A_i^F = \sum_{r=1,2,3,4} \sum_{j \in D_r} R_j, \quad (6)$$

两步移动搜索算法直观易懂且易于实施, 是针对地理空间位置和城市交通可达性的流行的评价方法之一。

本文针对长沙市中心城区的居民点和医疗急救站点的供需关系, 利用城市交通路网, 将救护车在城市道路中的行驶时间作为成本来构建两步移动搜索算法中的 OD 成本矩阵, 急救服务平均反应时间目前为 18 分钟左右, 其中有 3 分钟的院前反应急救时间, 因此本文以救护车 15 分钟作为驾驶时间成本作为阻断条件进行构建 OD 时间成本矩阵, 得到 742 条“需求 - 供给”矩阵连接线条, OD 成本矩阵可视化如下图 7 所示。

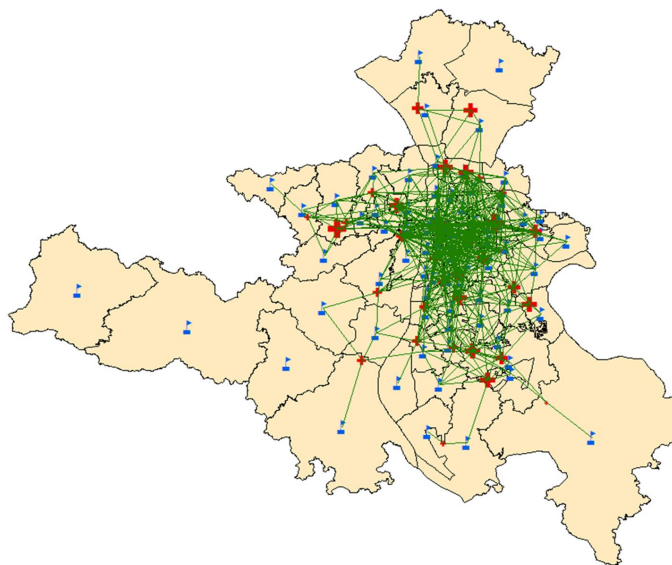


Figure 7. OD cost matrix within 15-minute ambulance travel time
图 7. 救护车 15 分钟 OD 成本矩阵^①

由 OD 成本矩阵建立的拓扑关系网络, 可计算出每个医疗急救站点所服务的人口总和, 由每个医疗急救站点所属的急救医院的病床数作为供给量来计算出供需比, 再对每个居民点的供需比进行求和得到每个居民点的 A_i^F , 采取自然断点分级法对长沙市中心城区的街道乡镇居民点的 A_i^F 进行可视化, 如图 8 所示。

由医疗急救站点可达性评价图可得知, 长沙市中心城区医疗急救可达性空间差异大, 大致呈现出向郊区不断递减的圈层结构。医疗急救告知集聚在长沙市中心位置和北部, 中心城区的外围城市乡镇街道的医疗急救可达性低, 甚至出现医疗急救可达性为 0 的四个地区, 分别为雨敞坪镇、莲花镇、含浦街道和沙坪街道, 这四个街道乡镇都分布在长沙市中心城区的外围地区, 说明长沙市中心城区的医疗资源分布空间不平衡, 对于居民急救资源的供求没有做到全覆盖, 具有医疗急救不公平性。

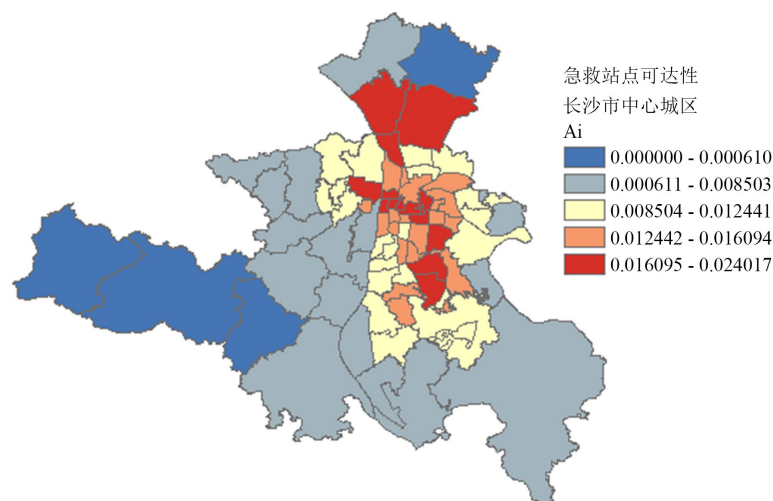


Figure 8. Accessibility evaluation map of medical emergency sites in central urban area of Changsha City

图 8. 长沙市中心城区医疗急救站点可达性评价图^①

(五) 潜能模型

潜能模型是区域经济学和城市规划中常用的分析方法，其原理来源于万有引力定律，常用来研究社会、经济空间的相互作用，描述社会经济活动中的空间相互作用强度。其计算步骤如下所示：

1. 计算居民点和医疗急救站点之间的 OD 成本矩阵；
2. 计算居民点和医疗急救站点两两之间的势能；
3. 计算每个居民点选择某医疗急救站点的概率；
4. 查看某医疗急救站点的潜能分布。

本文利用潜能模型来确定每个医疗急救站点的服务范围，其计算公式如下所示：

$$A_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{D_{ij}^\gamma}, \quad (7)$$

其中， A_i 表示居民点 i 的潜能总和； A_{ij} 表示居民点 i 至医疗急救站点 j 的空间潜能； W_j 表示医疗急救站点 j 的服务能力，用病床数表示； D_{ij} 表示居民点 i 到医疗急救站点 j 之间的成本，用 OD 时间成本矩阵表示； γ 表示出行阻抗系数，本文阻抗系数取 1。

本文利用之前构建的 OD 时间成本矩阵拓扑关系网络，可计算出乡镇街道居民点到不同医疗急救站点之间的成本，然后由医疗急救站点所属的急救医院的病床数作为医疗急救站点的服务能力，来计算不同居民点选择医疗急救站点的概率，对长沙市中心城区的街道居民点的潜能模型系数进行可视化，如图 9 所示。

由潜力模型的服务区划定可得知，有四个街道乡镇没有被医疗急救站点服务区所覆盖，分别为雨敞坪镇、莲花镇、含浦街道和沙坪街道，反映医疗急救站点资源分布的区位供给不均衡性、不公平性。

综合潜力模型和两步移动搜索法可得知，长沙市中心城区的医疗急救站点地理分布特征呈现出“核心-边缘”的空间分异特征，潜力模型分析出医疗急救站点服务覆盖的不公平性，两步移动搜索法揭示出医疗急救站点的不平衡性，从城市整体空间公平性和区位可达性双重维度下，综合揭示出医疗急救服务资源的配置特征的不平等性，因此可进一步对长沙市中心城区的医疗急救站点布局优化、资源均衡配置提供科学依据。

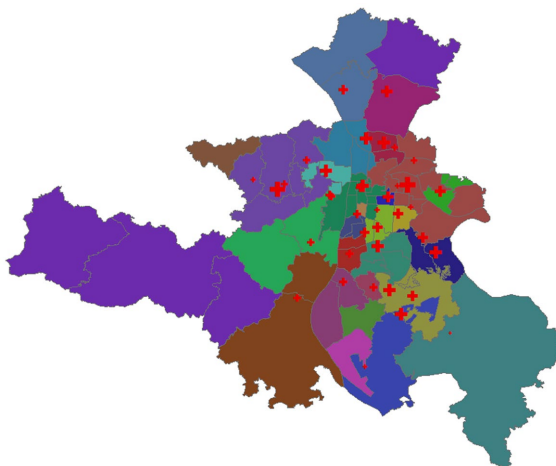


Figure 9. Service areas of medical emergency sites based on potential model
图 9. 基于潜力模型的医疗急救站点服务区^①

5. 最优区位配置

(一) 服务区分析

哈夫模型是服务区分析的主要模型，是哈夫教授提出的关于预测城市区域内的商圈规模的模型，本文利用哈夫模型对消防站点的服务区域进行建模。

哈夫模型的公式为：

$$P_{ij} = \frac{S_j d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{k=1}^n S_k d_{ik}^{-\beta}}, \quad (8)$$

其中， P_{ij} 为消费者选择商店 j 的概率， S 为商店的规模， d 为距离， $\beta > 0$ 为摩擦系数。

本文利用 GIS 软件中，以 5 千米为搜索容差，设置驾驶时间为阻抗条件，以救护车驾驶时间 15 分钟为阻断，为了防止医疗急救站点之间对同一突发事件都同时做出反应，以下的服务区分析都是基于服务区不重叠选项进行建模，可得到长沙市中心城区消防站点服务区如下图 10 所示。

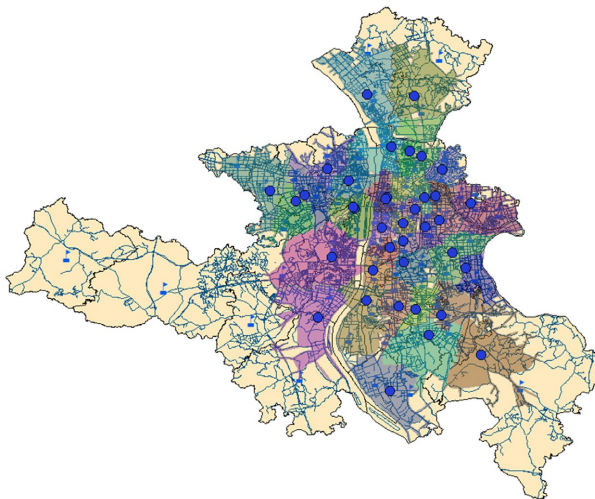


Figure 10. 15-minute service areas of medical emergency sites
图 10. 医疗急救站点 15 分钟服务区^①

由医疗急救站点 15 分钟服务区图可知,目前的长沙市医疗急救存在着边缘未覆盖,城市核心区域医疗急救高度重合覆盖,且城市核心区域存在着未被医疗急救站点 15 分钟服务区覆盖的空隙部分,说明长沙市医疗急救站点分布的不合理性。

(二) 最优区位配置模型假设

最优区位配置模型是基于空间供需均衡、成本最小化、效益最大化和公平性最优的规则下,在给定城市区域、人口分布、交通路网和现有设施布局约束下,进行新增设施选址、现有设施优化布局、服务范围划分的空间运筹模型。本文选取最优区位配置模型中的最大覆盖范围模型和最小化设施点数模型对长沙市中心城区的医疗急救站点进行选址优化。

1. 最小化设施模型:

设 $X = \{X_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为应急设施需求点集合, $Y = \{Y_j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 为候选应急设施点集合, d_{ij} 为从点 X_i 到 Y_j 的距离(或时间), D 为从 X_i 到 Y_j 的最大限制距离(或时间)。设示性函数:

$$I(x_j) = \begin{cases} 1, & Y_j \text{ 被选中} \\ 0, & Y_j \text{ 未被选中} \end{cases}, \quad (9)$$

则最小化设施点数模型可表达为:

$$\min z = \sum_{j=1}^m I(x_j), \quad (10)$$

$$s.t. \sum_{j=N_i} I(x_j) \geq 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

$$N_i = \{j | d_{ij} \leq D\}, \quad (12)$$

其中,式(10)为最小化应急设施数量;式(11)为保证每个 Y_j 至少覆盖一个需求点的约束条件;式(12)为控制从 X_i 到 Y_j 的距离(或时间)在应急要求内的约束条件。

2. 最大化覆盖范围模型:

延续上部分中对示性函数 $I(x_j)$ 的定义,并进一步定义示性函数:

$$I(y_i) = \begin{cases} 1, & X_i \text{ 被覆盖} \\ 0, & X_i \text{ 未被覆盖} \end{cases}, \quad (13)$$

则最大化覆盖范围模型可表示为:

$$\max \sum_{i \in I} I(y_i), \quad (14)$$

$$I(y_i) - \sum_{j \in J} a_{ij} I(x_j) \leq 0 (i \in I), \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^m I(x_j) = p, \quad (16)$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\} (i \in I, j \in J)$$

其中, $I = \{1, 2, \dots, n\}$, $J = \{1, 2, \dots, m\}$ 。式(14)表示应急设施需求点总和最大值, r_i 为应急设施需求点 i 的权重。式(16)约束选择的应急设施点总数目为 p 。

(三) 最大化覆盖范围

对现有 38 个医疗急救站点以 15 分钟驾驶时间为对医疗突发事件的响应时间进行最大化范围测度,得到长沙市中心城区现有医疗急救站点的现状评价和服务能力评估。以居民点作为突发事件发生模拟点,

即最大化覆盖范围的请求点。现利用 GIS 软件在每个行政区内都生成随机消防候选点，共计 150 个消防候选点，将其加载成为候选项，其分布情况如下图 11 所示。

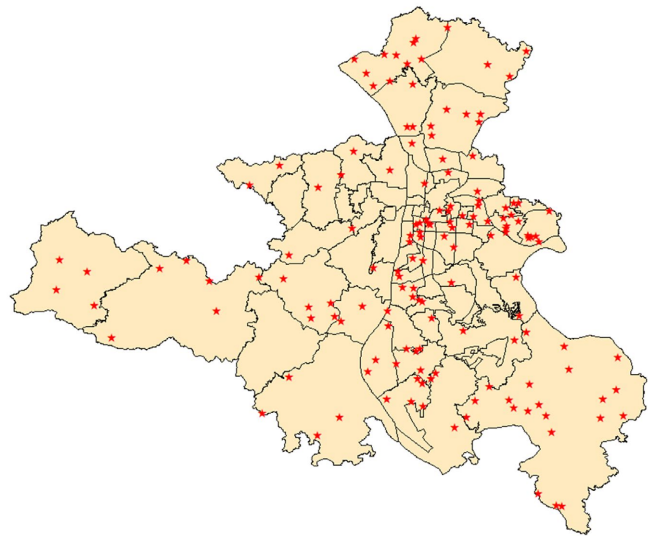


Figure 11. Distribution map of random candidate points for medical emergency sites
图 11. 随机医疗急救站点候选点分布图^①

将现有 38 个医疗急救站点设置为必选项，则可得到 188 个设施点，在这 188 个设置点中再进行最大化覆盖范围建模，得到结果如下图 12 所示。

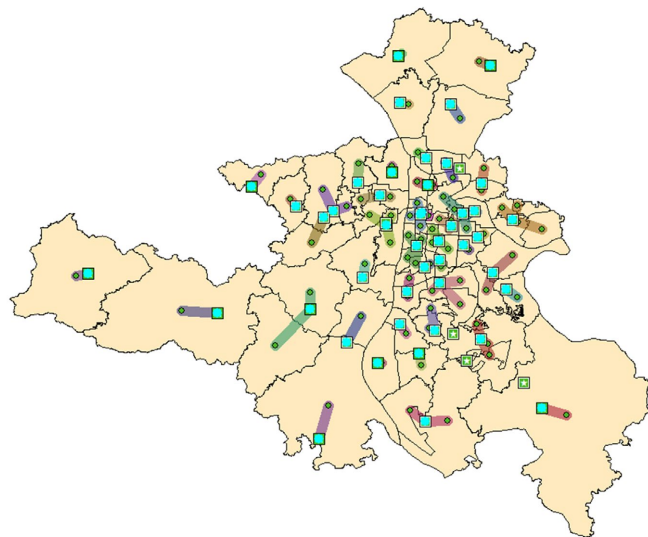


Figure 12. Maximum coverage scope of medical emergency sites
图 12. 医疗急救站点最大化覆盖范围^①

由最大化覆盖范围模型可以得知，共有 44 个医疗急救站点可以对周围的医疗卫生突发事件发生模拟点进行救护，其中有 9 个随机消防候选点，35 个已有的消防站点，其中长沙市第三医院的医疗急救站服务能力最强，能够服务到 4 个街道乡镇，服务人口总计 210,077 人，其急救服务范围实际情况如下图 13 所示。

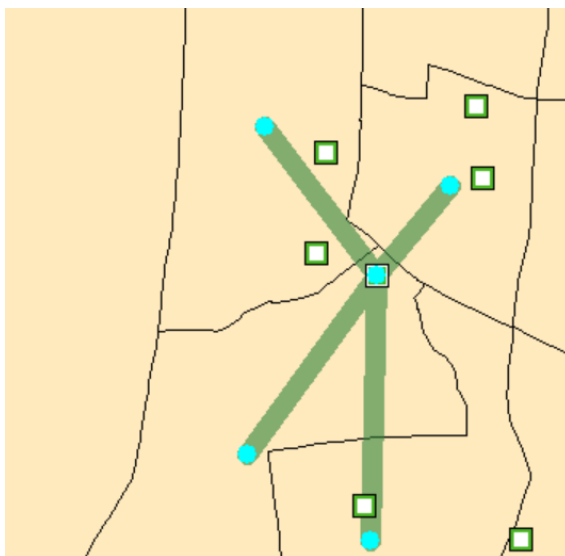


Figure 13. Maximum service coverage scope of medical emergency site at the Third Hospital of Changsha
图 13. 长沙市第三医院医疗急救站点服务最大化覆盖范围^①

(四) 最小化设施点数

本章节基于两个理想化场景进行最小化设施点数模型计算：场景一，在不添加随机医疗急救站点候选点的条件下，选取已有的医疗急救站点进行模拟；场景二，默认已有的医疗急救站点能发挥作用，对于不满足条件的区域进行随机医疗急救候选点模拟。对设施点进行选择，以在驾驶时间中断范围内尽可能的加权请求被分配到所求解的设施点，该模型的目标是确定所需服务设施的最少数目，并使所有的需求点都能被这些服务设施覆盖。

利用 GIS 软件中的网络分析的最小化设施点数分析，可得到最小化设施点数的位置分配模型如图 14 所示。

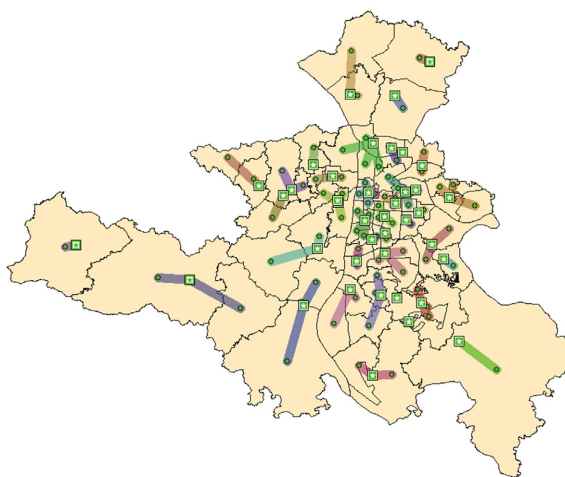


Figure 14. Minimization of facility points numbers
图 14. 最小化设施点数^①

由图 14 可知，共有 37 个医疗急救站点对长沙市中心城区的居民点进行覆盖，即要覆盖长沙市的商务住宅区域至少需要 37 个消防站点，其中只有 34 已有医疗急救站点，但是由最大化覆盖范围模型可知，

只有 35 个已有设施点位对商务住宅区进行,说明目前长沙市的医疗急救站点至少有一个存在服务区域重叠,并且已有的医疗急救站点并不能完全覆盖长沙市中心城区的医疗急救服务。

综上所述,目前长沙市中心城区存在医疗急救服务资源在地理空间分布上的浪费,且现有的医疗急救站点并不能完全覆盖长沙市中心城区的医疗急救需求。

6. 结论及优化策略

首先,长沙市中心城区内现有 38 个医疗急救站点,从医疗急救站点的服务区覆盖面积可得知,在 15 分钟救护车急救时间的限制下,基本上能覆盖上交通路网比较密集的地方,但是也存在一些细小的区域不能在交通路网密集处被医疗急救站点服务区所覆盖,同时在城市边缘的路网稀疏地方,已有的消防站点在 15 分钟内基本不能到达。

其次,通过区域统计和交通可达性的分析,长沙市医疗急救站点呈现出“核心-边缘”的地理空间格局特征。由基尼系数、差异系数和别特化系数,可以得到医疗急救行业呈现整体高度集聚的空间特征,医疗急救行业区域差异极大,圈层分化明显,并且存在产业空心化。由两步移动搜索法和潜能模型可得知长沙市中心城区的医疗急救服务的不均衡性和不公平性,因此对现有的医疗急救站点进行优化选址很有必要。

最后,应用位置分配模型对现有的医疗急救站点进行空间选址和优化,由最大化覆盖模型可得知需要 35 个现有医疗急救站点能覆盖住最大的中心城区区域,再由最小化设施点数模型可得知要覆盖住长沙市中心城区全区域至少需要 37 个医疗急救站点,其中有 34 个已有医疗急救站点,意味着在不考虑急救站点服务能力限制下,至少还需要建设 3 个医疗急救站点才能使得长沙市中心城区各乡镇街道享受到医疗急救服务,同时针对缺失的医疗急救站点,最小化设施点数模型也提供了相应的空间位置选址。

注 释

①本文所有图片均为作者自制

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发进一步完善院前医疗急救服务指导意见的通知[EB/OL]. <https://www.nhc.gov.cn/wjw/c100175/202009/07e1ddf9a8ee40b5a45dc8c89b5cd3c3.shtml>, 2020-09-17.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院印发《“健康中国 2030”规划纲要》[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm, 2016-10-25.
- [3] 刘敏. AHP 在急救服务选址中的应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(8): 124-127.
- [4] 周鑫鑫. 城市服务设施空间动态配置模型与量子优化方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(2): 344.
- [5] 韩冰. 基于多源数据的急救需求时空特征及院前急救设施布局研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [6] 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.
- [7] 刘宁, 王亚东. 基于地理信息系统的急救站布局研究[J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2025, 20(9): 1165-1169.
- [8] 吴瑶. 城市突发公共事件伤员救治出救点选择与车辆路径集成优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [9] 李建松, 何丽华, 田桦林, 等. 城市院前急救医疗服务点空间特征分析及优化[J]. 地理空间信息, 2024, 22(4): 20-25.
- [10] 李嘉磊, 李煜, 张真, 等. 城市急救圈空间的构建逻辑与规划策略[J]. 城市学报, 2025, 3(6): 84-93.
- [11] 王馨恬. 城市紧急救援系统绩效分析模型[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [12] 陈唯. 广东省院前急救资源配置现状及公平性分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2018.
- [13] 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.

-
- [14] 白盛男. 基于 SAPAD 的社区应急医疗服务设计研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [15] 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.
- [16] 严可. 急救医疗服务地区间公平性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆医科大学, 2018.
- [17] 长沙市统计局. 2020 长沙市人口普查年鉴上册[EB/OL]. <http://tjj.changsha.gov.cn/tjnj/2023/1/1.htm>, 2023-06-15.