

# 基于网络地图数据的城市消防救援可达性评价及优化——以长沙市为例

## Evaluation and Optimization of Urban Fire Rescue Accessibility Based on Network Map Data -- A case Study of Changsha City

马成也<sup>1</sup>, 吴世海<sup>2</sup>, 王希诺<sup>3</sup>, 宋明星<sup>4</sup>

**摘要:** 本研究以长沙市为例, 探讨了以消防救援站为代表的城市应急救援设施布局的合理性及其可达性评价。传统基于静态空间分析的可达性研究忽略了城市的动态性, 本研究通过调用网络地图 API 的方法实现对实时交通时间成本数据的获取, 实现了对动态可达性的精准评估。研究结果显示, 全市域范围内交通高峰期相较于低谷期, 城市总体应急救援时间显著升高, 难以满足 5 分钟的响应标准, 时间成本在 10min 以上的对象达到 43.61%。在可达性的空间公平性方面, 高峰期也相较于低谷期有明显升高, 但都在相对公平范围内。通过对可达性和可达性的公平性评价筛选出市域范围内设施可达性薄弱区域, 利用多目标优化算法对以马栏山片区为代表的薄弱区域进行应急救援设施的配置优化, 使该片区全域消防救援时间成本维持在 5min 以内。从而实现城市应急救援服务的可达性评价到布局优化的工作流。

**关键词:** 应急救援设施; 可达性; 布局公平性; 消防救援站

**Keywords:** Emergency rescue facilities; Accessibility; Layout fairness; Fire rescue station

**资助项目情况:** 湖南省自然科学基金面上项目, 2023JJ30148, 气候适应下长株潭城市群城市空间韧性评估与优化研究; 湖南省教育厅科学研究项目, 23C0125, 基于多智能体的城市公共服务设施配置优化选址研究。

### 引言

城市应急救援设施选址布局是城市规划、管理和运营的一项重要工作, 是城市应对各类灾害、事故和突发事件风险能力的重要影响因素。如何科学有效地配置应急服务设施是推进城市高质量发展的重要任务。消防救援站承担着包括消防救援、自然灾害、事故灾难救援或社会安全等突发事件应对在内的各类型城市应急事件的响应工作<sup>[1]</sup>。

作为城市消防机构基础单元, 消防救援站布局直接影响应急救援网络的可达性。当前长沙市中心城区的应急救援服务主体包含 35 个消防救援站。当前消防救援站点的布局缺乏有效的评估, 消防救援设施选址的行政决策欠缺数据分析, 要想对可达性差的区域进行针对性的补充和优化, 就必须先对市域范围进行一个准确的可达性评价。可达性评价涉及时间响应模型, 城市各个社区作为被救援对象是否被消防救援设施的服务半径有效覆盖是由响应时间决定<sup>[1]</sup>, 由于城市道路交通规划的特殊性和交通路况的复杂演变特征<sup>[2]</sup>, 消防救援响应时间也在动态变化且难以预测。

关于设施布局与可达性之间的关联性, 学者们展开过一系列的研究。可达性概念最初由

<sup>1</sup>马成也, 湖南大学建筑与规划学院, 博士研究生;

<sup>2</sup>吴世海, 长沙理工大学建筑学院, 讲师;

<sup>3</sup>王希诺, 长沙理工大学建筑学院;

<sup>4</sup>宋明星 (✉), 湖南大学建筑与规划学院, 副教授, 通讯作者邮箱 (Mason\_song@qq.com)

Hansen 提出,用于衡量空间中从一点到达另一点的难易程度<sup>[3]</sup>。消防救援的可达性等同为消防员到达被救援点的难易程度。对于选址研究有多种模型,包括位置集合覆盖模型(Location Set Covering Problem, LSCP)、最大幅该模型(Maximum Covering Location Problem, MCLP)、P-中心模型(P-Center)、P-中位模型(P-median)和多目标模型等。例如,利用 LSCP 模型可以实现确定需求数量但不确定环境下的应急救援设施的选址问题,并且所有需求点满足在规定的最大距离或时间内被覆盖<sup>[4]</sup>。运用 MCLP 模型可以在有限数量消防站的情况下达到最大化覆盖率,提供一种在资源限制下优化消防站位置的更实际的方法<sup>[5]</sup>。不同的选址模型可以应对不同的问题和需求。除了运用选址模型外,常见的可达性测度分析模型还包括最近距离法<sup>[6]</sup>、核密度模型<sup>[7]</sup>、两步移动搜索法(Two-step floating catchment area method, 2SFCA)<sup>[8]</sup>、空间句法<sup>[9]</sup>等。例如饶钰飞等人用高斯两步移动搜索法测度居民单一出行及多交通出行模式下城市公园绿地的客观和主观可达性<sup>[10]</sup>。以上可达性研究多集中在拓扑关系的空间维度的静态分析与建模,静态模型一般认为路网条件恒定,不考虑交通流量和时变因素的影响,以简化模型应对消防站点布局的分析。但也忽略了时空变化下的动态性,与道路的实际情况有偏差<sup>[11][12][13][14]</sup>。

在动态的可达性研究方面,较为有代表性的是通过调用网络地图实时路况数据来求得交通时间成本。例如,倪建华等人通过调用网络地图实时交通数据评估城市中卒中救援网络的可达性,考虑了不同时刻的医疗资源开放情况和道路交通情况<sup>[14]</sup>。Y. Chen 等人调用网络地图动态交通数据,并耦合兴趣点(POI)数据估算城市消防救援的有效覆盖率以及分析消防站有效覆盖范围的时空演变规律<sup>[15]</sup>。以及利用实时交通数据对消防救援覆盖进行了时空模式分析,研究揭示了不同时间和不同交通状况下覆盖范围的显著变化<sup>[16]</sup>。通过以上研究发现,交通路况对于可达性的影响非常大,所以基于动态时变特征的消防救援设施可达性评价和优化显得十分有必要。

本研究以长沙市为研究区域,进行基于交通时间成本的可达性评价。通过可达性分析、洛伦兹曲线和基尼系数可达性标准差等方法,分析全市域的可达性及可达性公平性,从而筛选出市域范围内应急救援设施可达性薄弱区域,并利用多目标优化算法对薄弱区域进行设施选址布局的优化计算。

## 1. 研究区域、数据与方法

### 1.1. 研究区域

我们选取的研究区域为长沙市主城区,即芙蓉区、开福区、天心区、雨花区、岳麓区,也称为长沙市内五区(图 1),面积为 1035 平方公里。

### 1.2. 数据

截止至 2023 年 12 月 31 日,长沙市建成消防救援站 35 座。本研究通过长沙市消防救援支队获取了 35 个消防救援站 POI 信息,其分布特征呈现出靠近城市中心区域的 POI 密集,靠近边缘区域的 POI 稀疏的特点。城市道路网络地图来源为 OpenStreetMap (OSM) (<https://www.openhistoricalmap.org/>)。

居住区的信息数据包括位置、面积、边界、名称等,均来自常用且更新较为及时的网络地图信息库百度地图开放平台(<http://lbsyun.baidu.com/>)。本研究一共获取 2660 个有效的居住区 AOI 数据。这些居住区的 AOI 呈现出越靠近城市中心区域越小而密集、越靠近城市边缘区域越分散的特征。(图 1)

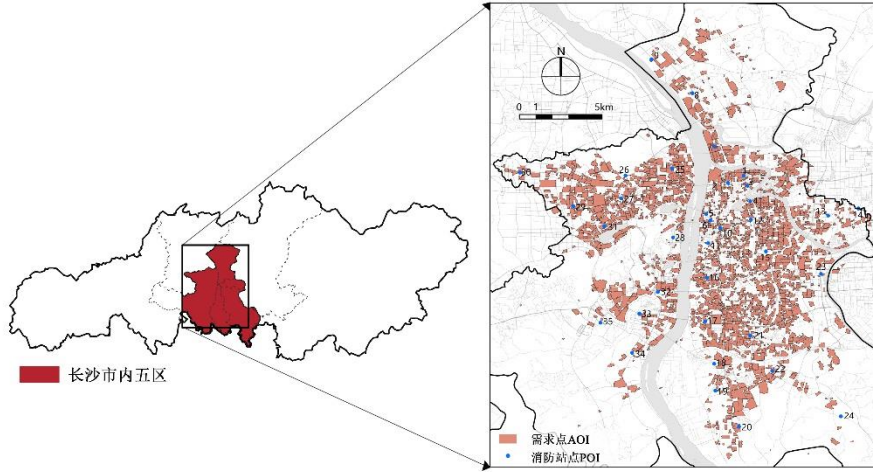


图 1 研究区域地理位置（左）及设施点 POI、服务对象 AOI、消防站应急救援辖区划分（右）

### 1.3.方法构建

应急救援网络的可达性可以量化为交通时间成本，交通时间成本与消防站在城市中的选址布局息息相关。基于当前市域范围内消防站的确切布局，通过 ArcGIS 处理将居住区 AOI 与相应的消防站 POI 进行分组，使每个 AOI 对应四个与其距离最近的消防站 POI，通过调用网络地图 API 分别计算时间成本，从中选出时间成本最低的一项保留。本部分工作将分三步展开：

第一步：数据的获取，包括：设施点 POI、居住区 AOI。对要素进行地理空间数据整合分组和数据清洗，将设施点设为起点数据集，将居住区设为终点数据集。

第二步：计算各个时刻的市域范围内所有对象消防救援时间成本，即时空可达性，时间成本的获取是通过调用百度地图应用程序编程接口（API）实现。具体方法为：1）使用百度地图开放平台的地理编码 API 功能对所有 POI、AOI 的名称和坐标进行地理编码获得坐标值。2）将起点和终点的坐标输入服务器。3）设定相应的搜索时刻发送搜索指令，本研究选择取 08:00、10:00、12:00、15:00、18:00、24:00 等六个时刻作为时间标本，覆盖所研究城市道路交通的车流高峰期和低谷期的不同特点。4）得到所有居住区在不同时刻下的相应消防救援站到达的时间成本以及路线规划。

第三步：在求得时间成本后进行数据分析，包括各种模式的可达性、可达性公平性等层面的对比分析。

其中，公平性分析运用到基尼系数和洛伦兹曲线对各类设施的可达性指标值进行分析，计算方式如(1)。可以以此判断公平性中的空间分布均好性<sup>[18]</sup>。

$$G = 1 - \sum_{k=0}^n (x_k - x_{k-1})(y_k + y_{k+1}) \quad (1)$$

式中  $x_k$  为空间分析单元内人口数的累积比例； $y_k$  为相应单元的可达性时间成本； $k$  为第  $k$  个空间分析单元的编号。

最后，通过以上分析对市域范围内消防救援情况方分布进行研判，筛选出前几区域，对该区域进行消防救援设施的配置优化，即新增设施的选址计算。

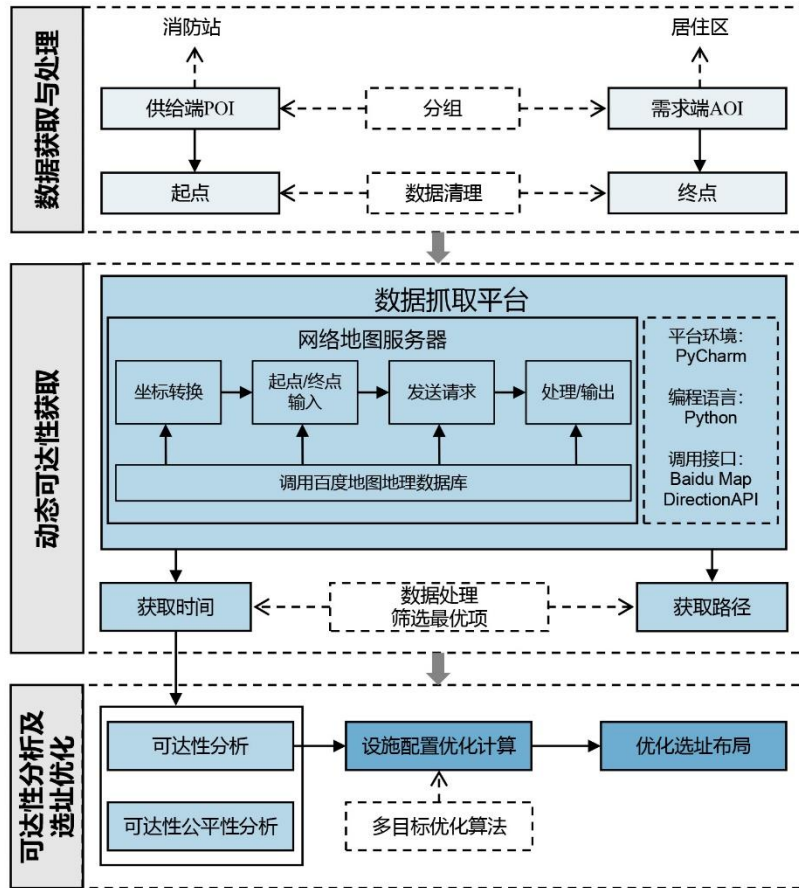


图 2 研究框架

## 2. 结果分析与优化计算

### 2.1. 消防救援可达性分析

本研究基于百度地图开放平台 (<http://lbsyun.baidu.com/>) 获取的数据统计结果发现, 研究区域交通早高峰通常出现于 07:00—09:00, 其中 08:00 左右的交通时间成本为一天中的最高值。晚高峰出现于 17:00—19:00, 其中 18:00 左右为晚高峰时段时间成本的峰值。平峰时刻以 10:00、12:00 和 15:00 为代表。凌晨 24:00 的交通低谷期可以作为一天中道路最通畅时刻的代表。因此, 本研究选择了以上 6 个时刻 (即 08:00、10:00、12:00、15:00、18:00、24:00) 为时间标本, 计算 6 个时刻的各个居民小区的消防救援网络可达性。

对时间成本的统计和可视化发现 (图 3), 全域的消防救援网络可达性分布不均匀, 存在大量超出消防救援响应时间范围的区域。且全天不同时间段的可达性差异明显。在交通高峰期, 时间成本大于 10min 的居住区数量为 1160 个, 占比为 43.61%。其中位于消防救援站附近的居住区可达性最好, 共有 339 个居住区的时间成本在 5min 以下。但在雨花区的东南部、芙蓉区和开福区的东部的可达性较差, 时间成本普遍在 10min 以上。在上午和下午的平峰时刻中。中午的 12:00 表现最优, 时间成本控制在 10min 以下的居住区多达 1990 个, 占比高达 74.81%。在夜间低谷时刻, 该数据多达 2288 个, 占比高达 86.02%。

此外我们还可以看到, 以长沙东部局部片区为代表的中心区域边缘片区都存在时间成本偏高的情况, 说明存在市中心消防救援资源聚集, 但中心区域周边的消防救援资源出现骤降, 与人



口需求空间发展不均衡（图 3）。

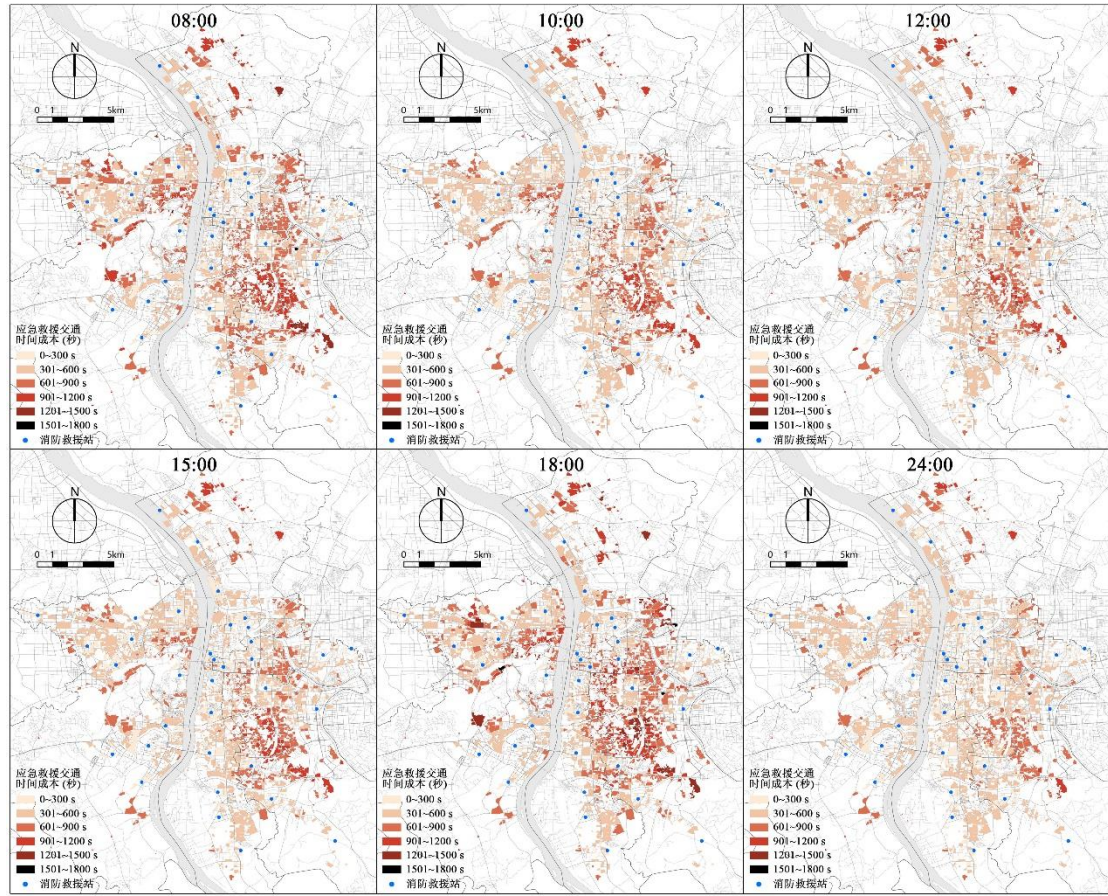


图 3 各个时刻的消防救援可达性空间分布

## 2.2.消防救援可达性公平性分析

为了从全市域范围内反映消防救援可达性的公平性水平，绘制了 6 个时刻可达性的洛伦兹曲线，并计算了对应的可达性基尼系数，结果如图 4 所示。从结果可以看到，各个时刻的时间成本基尼系数都在相对合理范围内。24:00 的基尼系数值为 0.265，是最低值。最高值出现在 18:00，达到 0.305，与公平性“较差”水平的临界值（0.4）相差 0.095，空间布局公平性在相对合理范围内。由于夜间交通状态为 6 个时刻中的最佳状态，24:00 为长沙市全域内 6 个时刻空间布局最公平的時刻。08:00 和 18:00 的可达性基尼系数值都是各个模式下偏高的存在。主要原因是 08:00 和 18:00 为交通高峰期的时刻，交通拥堵因素对于局部地区的公平性影响更大，是六个时刻中最不公平的两个时刻，18:00 尤为显著。10:00、12:00 和 15:00 的平峰时段的可达性基尼系数值都较为接近，洛伦兹曲线重合度也较高。据统计，1 月份和 13:00—22:00 是火灾发生最多的时间段<sup>[19]</sup>，该时段恰为交通低谷期时段。因此，对时间极为敏感的消防救援设施布局与规划进行决策时，城市规划者或研究者还应考虑灾害高发时段以及交通影响等重要影响因素。

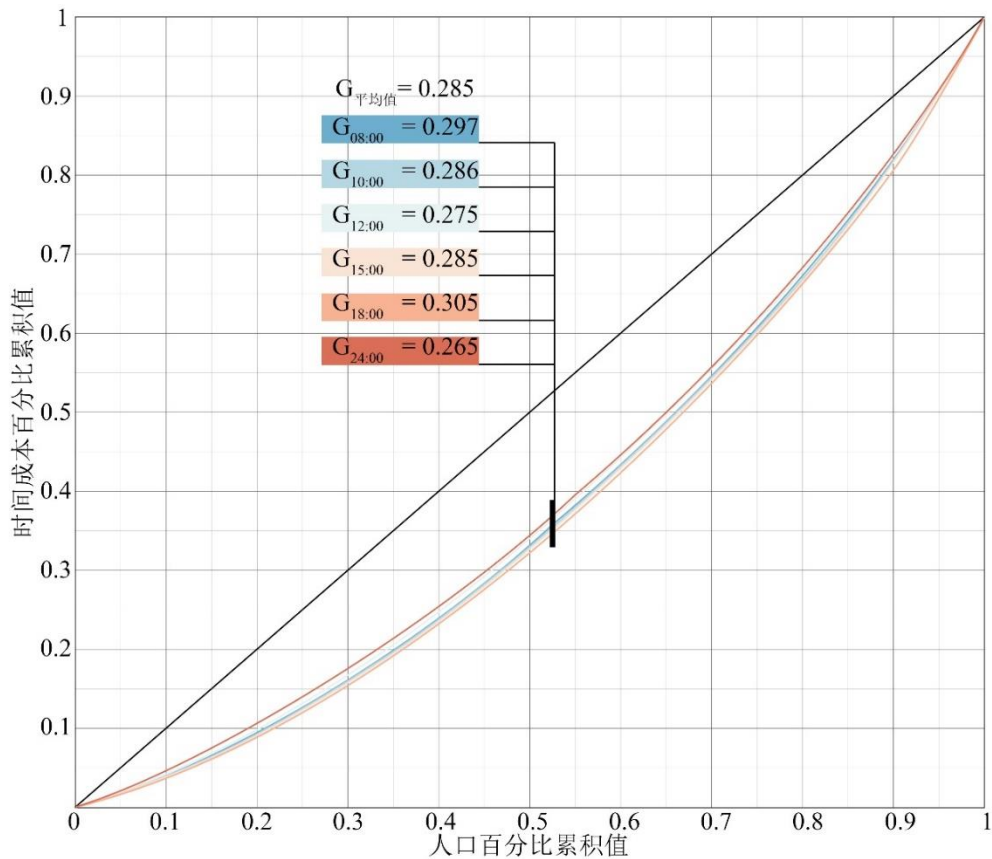


图 4 六个时刻的可达性洛伦兹曲线和可达性基尼系数

### 2.3. 基于多目标优化算法的薄弱区域配置优化计算

多目标优化问题 (Multi-objective Optimization Problem) 是由多个相互独立并相互矛盾的优化目标组成, 并试图在各优化目标之间进行相互权衡和取舍后做出最优决策的问题。在优化进行到一定程度之后, 某一个目标函数优化的实现需要以牺牲另一个目标函数为代价, 此时称解 A 和 B 均为多目标优化问题中的 Pareto 最优解, 而 C 则被 A、B 支配 (图 5)。由于多目标优化是多个目标相互制衡的优化过程, 各优化目标之间存在此消彼长的关系, 因此最终的最优解是一个解集并非唯一的解。在解集中, 决策者可以根据自己的决策倾向做出进一步决策。如图 5 所示, 解集的空间分布代表了解的优劣程度, 由最优解组成的前沿面被称为 Pareto 前沿面<sup>[21]</sup>。

根据各个时刻的消防救援可达性空间分布可以观察到市域范围内的部分区域存在明显的可达性偏低, 政府或规划部分应加大相应区域的消防救援资源投入, 并合理调整消防救援资源的时空部署, 以有效缓解供需矛盾。本研究选取其中一个区域进行配置优化计算, 以马栏山片区为例。本部分的选址模型构建是以最短服务距离、最短服务时间和最小设施点数为目标, 实现设施选址的最优区位选择和空间布局。已有的选址模型大多侧重于实现单一目标的最优化, 但实际问题并非单一目标最优化所能概括, 问题具有一定的综合性, 且往往不具有“最”优解。因此本研究将综合考虑区域内小区数量、居住人口、服务需求量等要素, 从消防救援设施到达时间成本最低、设施数量最少、新增消防救援设施与现有救援设施网络综合联系的全局出行成本最低等角度设定约束, 参考 p-中位模型逻辑进行选址模型构建。

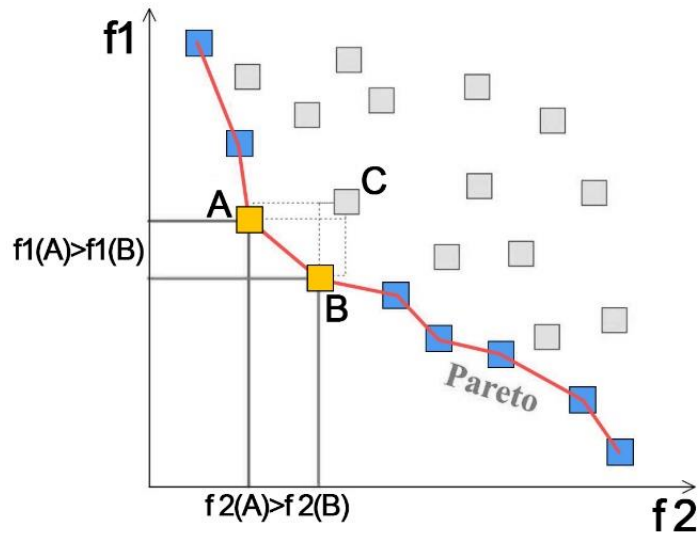


图 5 帕累托前沿解

p-中位模型中，选址区域为有限点组成的集合，距离形式为任意形式，目标函数为总运输成本最低。P-中位模型限制了枢纽个数，每个需求点只能与一个枢纽建立连接，可用以下模型表示：

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} (w_k d_{kj}) x_{kj} \quad (2)$$

K: 节点集

J: 选址设施集

$w_k d_{kj}$ : 节点 k 与设施 j 之间的加权距离

$$x_{kj} \begin{cases} 1, & \text{如果节点 } k \text{ 由设施点 } j \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

依据城市建筑面积信息统计分析可以大致估计每个需求点的人口数量，赋予模型中需求点相应的权重。在多个优化目标的条件下，权重差异会使得数值跨度悬殊，导致帕累托最优解集不够理想，影响优化结果。所以需在多目标优化中加入“归一化”步骤（图 6）。在此基础上进行多目标优化运算，得到帕累托最优解集后选取结果进行比对（图 7），最终选取一个适合于现状情况的选址方案（图 8）。

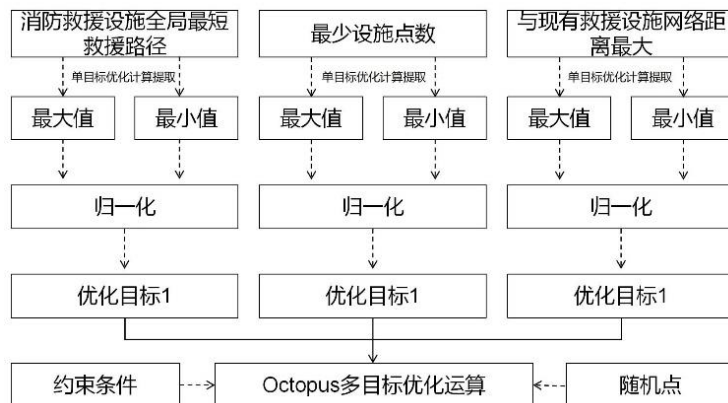


图 6 归一化流程



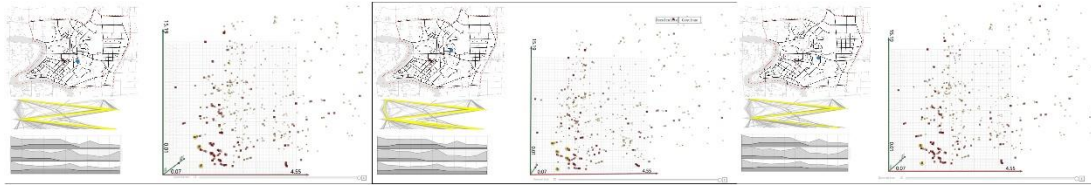


图 7 多次运算实验下的多目标优化生成结果比照

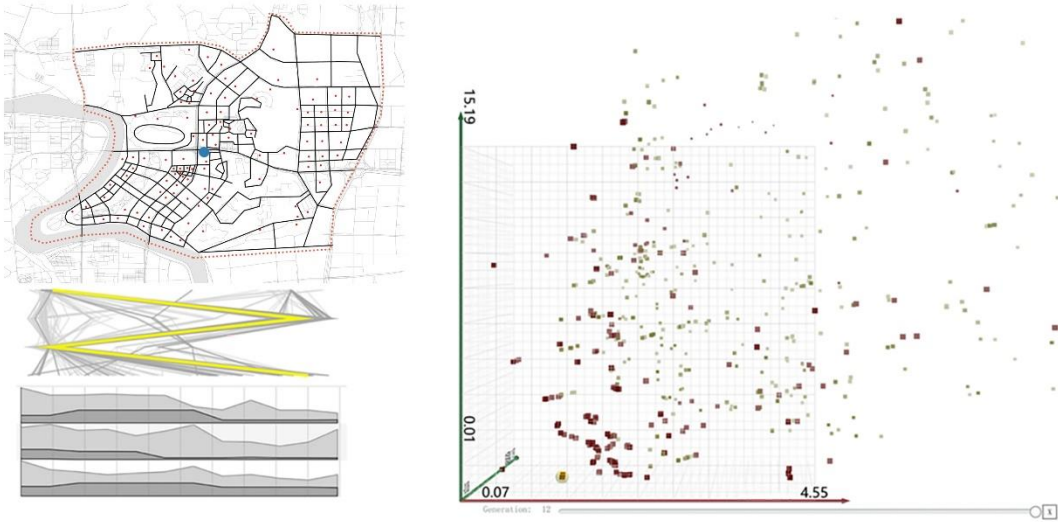


图 8 最终选取的优化生成结果

## 结论

大数据时代的到来对城市领域的研究产生冲击，但同时也是学科发展的动力<sup>[22]</sup>。传统的可达性研究忽略城市交通网络的动态性和设施网络一体化服务的整体可达性问题，本研究基于网络地图实时交通数据构建一种基于 GIS 和大数据的动态可达性评价模型。通过调用网络地图 API 计算 1 天中 6 个代表性时刻消防救援的交通时间成本，分析和评价了消防救援可达性动态变化规律和可达性公平性变化规律。结果表明：1) 随着时间变化，城市消防救援网络的可达性和公平性有显著变化早晚高峰时刻的可达性和公平性都明显下降，受交通流量影响产生较大波动。2) 无论是在交通高峰期、平峰期还是低谷期，市域范围可达性公平性都维持在合格水平。3) 市域范围内部分区域存在明显的可达性偏低，政府或规划部分应加大相应区域的消防救援资源投入，并合理调整消防救援资源的时空部署，以有效缓解供需矛盾。在此基础上，本研究利用多目标优化算法对可达性薄弱区域进行配置优化计算，引入选址模型计算得到片区新增消防救援设施的最优选址。

本研究的不足之处在于：一是对于动态可达性的研究，火灾的发生具有较强的时间规律性，针对该规律提出更为合理的布局优化方案也是未来研究以及消防救援设施时空优化的重要研究方向。二是关于选址计算模型，公共服务设施的选址本身是综合权衡的结果，还受到当地行政、经济因素等多方面要素的影响，本文仅从拓扑学和空间分析角度考虑养老及托幼设施的选址，未来的研究可将上述其他因素通过量化指标整合到选址模型中，使该模型更加严谨周到，为公共设施的选址决策工作提供参考。



## 参考文献

- [1]. 刘伟军,李颖,刘顶立,徐志胜,朱思程.基于网络开放数据的区域消防救援总体有效覆盖率评估[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(02): 666-674.
- [2]. 张振龙,邱煜卿,蒋灵德,等.基于实时路况的交通拥堵时空特征及其影响因素分析——以苏州古城区为例[J].现代城市研究,2020(01):104-112.
- [3]. W. G. Hansen. How accessibility shapes land use[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959, 25(2): 73-76.
- [4]. B. Zhang, J. Peng, S. G. Li. Covering location problem of emergency service facilities in an uncertain environment[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 51: 429-447.
- [5]. J. Wang, H. Liu, S. An, N. Cui. A new partial coverage locating model for cooperative fire services[J]. Information Sciences, 2016, 373: 527-538.
- [6]. 吴超, 王其东, 李珊. 基于可达性分析的应急避难场所空间布局研究——以广州市为例 [J]. 城市规划, 2018, 42(4): 107-112, 124.
- [7]. 王远飞, 张超. GIS 和引力多边形方法在公共设施服务域研究中的应用——以上海浦东新区综合医院为例 [J]. 经济地理, 2005, 25(6): 800-803, 809.
- [8]. 李孟桐, 杨令宾, 魏冶. 高斯两步移动搜索法的模型研究——以上海市绿地可达性为例 [J]. 地理科学进展, 2016, 35 (8): 990-996.
- [9]. 盛强, 杨滔, 刘星. 酒香不怕巷子深?——基于大众点评数据对王府井街区餐饮业分布的空间句法分析[J]. 新建筑, 2018, (05): 124-129.
- [10]. 饶钰飞, 邹亚锋, 罗锋, 易呈锋, 杜平平, 吴聘奇, 吕昌河. 基于两步移动搜索法的福州市公园绿地主客观可达性研究[J]. 生态学报, 2024, 10.20103/j.stxb.202308141750(10): 1-17.
- [11]. 刘晓慧,刘永伟,蔡菲,等.面向时空可达性的城市应急医疗机构推荐方法[J].地球信息科学学报,2019,21(09):1411-1419.
- [12]. B. Y. Chen, X.-P. Cheng, M.-P. Kwan, T. Schwanen. Evaluating spatial accessibility to healthcare services under travel time uncertainty: A reliability-based floating catchment area approach[J]. Journal of Transport Geography, 2020, 87: 102794.
- [13]. 王姣娥,熊美成,黄洁.时空约束下的地铁可达性研究: 以北京为例[J].地理科学,2022,42(01):83-94.
- [14]. 倪建华, 陈杰, 袁哲沛, 陈子豪, 王杰. 城市卒中急救网络动态可达性评价——以合肥市为例[J]. 热带地理, 2023, 43(12): 2359-2368.
- [15]. Y. Chen, Y. Li, G. Wu, F. Zhang, K. Zhu, Z. Xia, Y. Chen. Exploring spatiotemporal accessibility of urban fire services using real-time travel time[J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(8):
- [16]. Z. Xu, D. Liu, L. Yan. Evaluating spatial configuration of fire stations based on real-time traffic[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 25:
- [17]. 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市消防规划规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [18]. 王兰, 周楷宸, 汪子涵. 健康公平理念下社区养老设施的空间分布研究——以上海市中心城区为例[J]. 人文地理, 2021, 36(01): 48-55.
- [19]. 王湛. 基于数据挖掘和 GIS 技术的城市火灾分析[D].中国矿业大学,2022.
- [20]. T. Xia, X. Song, H. Zhang, X. Song, H. Kanasugi, R. Shibasaki. Measuring spatio-temporal accessibility to emergency medical services through big gps data[J]. Health & place, 2019, 56: 53-62.
- [21]. 李金泽. 村镇公共设施优化配置选址模型研究[D].东南大学,2021.
- [22]. 叶堃晖, 苏晓倩. 数据驱动下山地城市避难场所空间布局供需错位研究——以重庆市渝中区为例[J]. 城市发展研究, 2022, 29(01): 54-59+33.