

中文引用格式:雷斌,李宇锦,李娜,等. 考虑节点重要度的地铁应急救援站选址研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):207-219.

英文引用格式:LEI Bin, LI Yujin, LI Na, et al. Location optimization of metro subway emergency rescue stations considering node importance[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 207-219.

考虑节点重要度的地铁应急救援站选址研究^{*}

雷斌¹教授,李宇锦¹,李娜²,刘伟³,罗林林³,雷东波³

(1 西安建筑科技大学 城市发展与现代交通学院,陕西 西安 710055;

2 西安汽车职业大学 轨道交通学院,陕西 西安 710600;

3 西安市轨道交通集团有限公司 运营分公司,陕西 西安 710018)

中图分类号:X913.4; U231.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1151

资助项目:陕西省重点研发计划项目(2025SF-YBXM-142);陕西省交通科技项目(20-05R)。

【摘要】 为探究地铁网络在规划建设阶段的区域级和基地级应急救援站科学合理选址问题,首先,基于复杂网络理论构建地铁网络拓扑结构模型,选取相关指标构建节点重要度的评估体系,利用地理加权回归模型(GWR)预测客流量以补充研究数据;其次,以效率最高、覆盖最优以及成本最低为目标建立区域级应急救援站的多目标选址模型,选用非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ)求解最优方案;同时,设计一种混合分析计算方法,求解模型中节点的综合重要度值参数,并依托区域级应急救援站的选址结果,选用枚举法求解基地级应急救援站选址的最优方案;最后,以西安市地铁规划网络为例验证计算。结果表明:与“不考虑节点重要度”情况下的选址最优方案相比,“考虑节点重要度”的区域级选址方案成本节省约2.19%,救援效率提高约9.43%,覆盖程度优胜约4.66%,故“考虑节点重要度”的选址方案更符合地铁网络的实际需求。

【关键词】 应急救援站选址; 节点重要度; 地铁系统; 地理加权回归模型(GWR); 非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ)

Location optimization of metro subway emergency rescue stations considering node importance

LEI Bin¹, LI Yujin¹, LI Na², LIU Wei³, LUO Linlin³, LEI Dongbo³

(1 College of Urban Development and Modern Transportation, Xi'an University of

Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 College of Rail

Transit, Xi'an Vocational University of Automobile, Xi'an Shaanxi 710600, China;

3 Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., Operating Branch, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to study the scientific and reasonable location selection of regional emergency rescue stations and base-level emergency rescue stations in the planning and construction stage of the subway network, firstly, the topology model of the subway network was constructed based on complex network theory. Relevant indicators were selected to construct the evaluation system of node importance, and GWR model was used to predict passenger flow to supplement the research data. Secondly, aiming at the highest efficiency, optimal coverage and lowest cost, the multi-objective location model of regional emergency rescue stations was established, and NSGA-Ⅱ algorithm was used to solve the optimal scheme. At the same time, a hybrid analysis calculation method was designed to solve the comprehensive importance value

parameters of nodes in the model, and based on the site selection results of regional emergency rescue stations, the enumeration method was used to solve the optimal solution of base-level emergency rescue stations. Finally, Xi'an metro planning network was taken as an example to verify the calculation. The results show that compared with the optimal solution in the case of "no consideration of node importance", the regional location solution with "consideration of node importance" saves about 2.19% in cost, improves the rescue efficiency by about 9.43%, and exceeds the optimal solution with about 4.66% in coverage. Therefore, the location scheme of "considering node importance" is more in line with the actual needs of the subway network.

Keywords: location of emergency rescue stations; node importance; subway system; geographic weighted regression (GWR); non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)

0 引言

随着城市轨道交通的网络化发展,地铁作为资源集约利用的大运量运输方式,在提供高服务水平和环境效益的同时,也面临着突发事件引发严重运营事故的挑战,甚至导致地铁网络整体的安全运营受到威胁。现有地铁应急救援站选址研究多依赖历史客流数据,且在已建成地铁线网中改扩建应急救援站的成本高难度大,难以应对实际问题。因此,以规划建设阶段的地铁路网为研究对象,结合站点重要程度进行科学合理选址,对避免二次搬迁或增改所带来的经济损失和资源浪费至关重要。

地铁应急救援站选址决策问题的研究始于20世纪50年代,经实践研究发现,以单一目标作为约束条件设置应急救援站的选址模型难以满足实际需求^[1-3],因而适应多目标需求的选址模型逐渐被广泛应用。TRIVEDI等^[4]综合层次分析法、模糊集合理论和目标规划等多种方法,提出了一种混合的多目标决策模型用于应急避难点的选址研究。张宇等^[5]基于地铁系统脆弱性评价,建立了多层级协同的地铁应急救援基地选址多目标优化模型。

网络中某些节点的失效会影响网络整体的结构和效率,这些节点被称为重要节点,如何衡量不同节点的重要程度是现阶段复杂网络研究的关键问题之一。地铁网络中识别重要节点的研究主要涉及动态指标和静态指标2个方面^[6],静态指标多从线网拓扑结构特征、客流负载情况等方面选取;动态指标评价多从采用节点删除^[7]或移除法等角度展开,研究站点失效前后对网络运营状态的影响。在实际应用中,节点重要度往往受制于多种因素的综合影响^[8],因而学者们开始基于多因素研究节点重要度评价体系的建立,如梁青槐等^[9]从度中心性、接近中心性和介数中心性3个维度建立车站在网络拓扑结构中的重要度指标;孙剑萍等^[10]从节点拓扑性、

车站属性和网络连通属性3方面出发,建立节点重要度评价方法,并基于熵权和逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)确定了武汉地铁网络中节点的重要度。站点客流量能够为地铁路网的节点重要度评估提供数据支持,对于规划中的新建路线和尚未开通运营线路的站点,需要建立地铁客流量与其影响因素间的关系模型,进而预测其客流量以获取数据。地理加权回归模型(Geographic Weighted Regression, GWR)考虑空间自相关性问题和最小二乘法的多元回归模型(Ordinary Least Squares, OLS)存在的空间异质性问题^[11],为每个站点提供局部回归模型,从而更加准确地反映地铁网络中各站点的空间关系,适用于处理地理位置上的局部变化。

鉴于适应多目标需求的选址模型在应急救援领域的广泛应用,以及综合多因素的节点重要度评价体系的研究趋势,笔者拟以地铁规划建设阶段的路网为研究对象,在考虑节点重要度的情况下,寻找路网中应急救援站的最优选址方案。

1 地铁网络节点重要度评估

为了全面评估突发状况时地铁网络的应对能力和鲁棒性,需要深入了解各站点对地铁网络局部和全局性能的影响程度,即节点重要度。文中定义地铁节点重要度为:某节点在所处网络环境中,凭借其战略位置和自身属性,对网络功能发挥所具有的相对影响力。突发事件下,度值越高的节点对该区间或整个地铁系统的运行和应对能力产生的影响越大。

1.1 指标体系

结合前文的研究现状分析,节点重要度通常取决于多种因素的综合作用,故基于网络拓扑结构、网络连通性及站点自身属性3方面,搭建地铁网络节点的重要度评价体系,如图1所示。

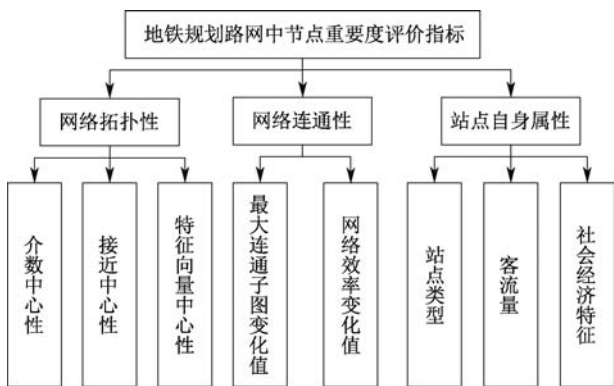


图 1 节点重要度识别评价体系

Fig. 1 Node importance recognition evaluation system

1.1.1 网络拓扑性

在地铁网络中,节点之间通过多种间接连接传递客流信息,具有多条线路连接以及多个换乘通道的站点在网络中往往更加重要,因此,关键节点的突然失效可能导致整个网络中断。将地铁网络和复杂网络分析的拓扑指标相结合,选取以下指标作为节点重要度评价体系之一。

- 1) 介数中心性。衡量节点在网络中的传递性和中介性。
- 2) 接近中心性。衡量节点在网络中与其他节点之间距离。
- 3) 特征向量中心性。衡量当前节点与其邻近节点的网络重要度。特征向量通常表现出正负方向性,故在计算时将数据对应的绝对值作为计算对象以消除影响。

上述指标均与节点重要度呈正相关,其值越大,表明突发事件下该节点会对该区间或整个地铁系统的运行和应对能力产生显著影响。

1.1.2 网络连通性

地铁网络中,移除失效节点会引起网络拓扑结构的动态改变,进而影响网络连通性。文中假设站点发生双向运营中断时,失效范围涵盖失效站点本身及其所在的同一折返区间内的其他站点和线路。

- 1) 最大连通子图变化值。即站点失效前后的网络图对应的最大连通子图的差值的绝对值,用以衡量站点失效前后对于地铁网络连通性的影响。值越大,说明失效站点对网络连通性影响越大,该站点越重要。

- 2) 网络效率变化值。在地铁网络中,局部效率主要揭示站点间的局部信息交流效果,全局效率主要体现整个网络的连通可靠程度。故选用网络中所有节点对效率的平均值即全局效率,作为节点重要

度评价指标之一,以衡量网络中节点之间的信息传递效率。其值越大,表明网络连通性越好。

1.1.3 站点自身属性

为综合剖析站点在地铁系统中的地位和作用,以更准确地评估站点重要程度,从站点自身属性方面选取了如下评价指标。

- 1) 站点类型。评估处于不同战略位置和功能
- 的站点,能够为综合决策提供更精确的参考依据。按照运营性质将车站分为始终站、中间站、折返站、换乘站和连接停车场、车辆段的站点,并分别赋值为 1,1,2,3,3。当站点同时符合几种类型时,其取值按数值最大者计算。

- 2) 客流量。在特定时间范围内,计算地铁系统中所有站点的客流量平均值,得到系统日均客流量,有助于评估地铁系统的整体运营状况。

针对研究对象中暂无实际客流量数据的站点,以站点客流量为因变量,以客流量的影响因素为解释变量,构建 GWR 客流预测模型。其中,使用高斯函数构建空间权重矩阵以衡量每个站点

对周边站点的

影响程度。采用连续型单调递减函数描述 ω_{xy} 和 d_{xy} 的关系,函数表达式为:

$$\omega_{xy} = \exp\left(-\left(\frac{d_{xy}}{b}\right)^2\right) \quad (1)$$

在带宽范围内,各位置样本相对回归样本点 x 的权重矩阵为:

$$W(x) = \begin{bmatrix} \omega_{x1} & & & \\ & \omega_{x2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \omega_{xN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ω_{xy} 为站点 y 的变量相对于站点 x 的权重; d_{xy} 为站点 x 与站点 y 之间的距离, m ; b 为带宽, m 。

带宽是距离与权重之间函数关系的非负衰减函数,分为固定型和适应型。固定型带宽的取值与样本点的分布密度无关,适用于样本点分布相对均匀的情况;适应型带宽根据样本点的空间密度变化而动态调整,保持相对稳定的内样本点数量^[12]。常用的确定带宽的方法包括基于交叉验证 (Cross Validation, CV) 的模型泛化能力评估和基于赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 来权衡模型拟合优度与复杂性。其中, AIC 表达式^[12]为:

$$AIC = 2\gamma \ln(\hat{\sigma}) + \gamma \ln(2\pi) + \gamma \left(\frac{\gamma + \text{tr}(\mathbf{A})}{\gamma - 2 - \text{tr}(\mathbf{A})} \right) \quad (3)$$

式中:帽子矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹 $\text{tr}(\mathbf{A})$ 为带宽 b 的函数; $\hat{\sigma}$ 为

随机误差项方差的极大似然估计; γ 为样本量。

当 AIC 值最小时, GWR 取得最优带宽值。在样本小的情况下, AIC 转变为 AIC_c , 其表达式为

$$AIC_c = AIC + \frac{2K(K+1)}{\gamma - K - 1} \tag{4}$$

式中 K 为解释变量个数。当 AIC_c 最小时, GWR 模型取得最优带宽。

结合文献[13], 将客流量的影响因素分为土地利用、内部连通性以及外部连接性 3 大类型。

地铁站点周边的土地利用类型直接影响出行高峰时段的站点客流量和居民出行交通需求。为了多方位分析站点周边环境的多样性以及不同用地类型对客流的影响, 引入变量用地加权楼层面积 (Weighted Floor Area, WFA) 和土地多样性指数, 以提高预测模型的准确性。WFA 为所有用地类型的楼层面积与其相应权重之积的总和。土地多样性指数的表达式为:

$$H' = \frac{-\sum_{\alpha=1}^{\theta} (p_{\alpha}^y \times \ln(p_{\alpha}^y))}{\ln(\theta)} \tag{5}$$

式中: θ 为不同类型的土地利用种类的数量; p_{α}^y 为站点 y 缓冲区内第 α 类的土地利用在总面积中的比例。 H' 值越大, 土地利用类型越丰富、多样性越高。

在城市交通中, 公共交通内部的换乘便捷性会影响乘客的出行选择。考虑到轨道交通与公交之间的换乘较为普遍, 选取地铁车站周边 230 m 范围^[11]

内的公交车线路数目 L 作为研究的解释变量之一。

外部连接性即轨道交通与其他交通方式之间的衔接便捷性和站点可达性, 其中选取路网密度反映站点周边交通网络的密集程度和地区可达性。地铁路网以每个站点划分区域, 各区域内的地铁线路总长度与区域面积的比值即为路网密度 D 。其值越大, 表示该站点周边地铁路网越密集。基于多数学者的理论研究和实地调研, 采用 800 m 路网距离作为阈值建立地铁缓冲区^[14]。

3) 社会经济特征。不同社会经济群体出行需求的差异导致地铁站点的客流量在不同时间段有所变化, 故定义节点活跃度反映该节点在地铁网络中的社会经济地位及重要程度。节点缓冲区范围内的兴趣点 (Point of Interest, POI) 数量与其邻近范围面积的比值即为节点活跃度。其值越高, 表示该地铁站周围的商业和文化活动越丰富, 该节点重要性越高。

1.2 节点重要度值求解及分级

为克服单一方法的局限性, 提高站点重要性评估的准确性和可靠性, 结合文献[15-16], 采用网络层次分析法 (Analytic Network Process, ANP) 和 TOPSIS 法相结合的方法计算地铁网络站点的重要度。其中, ANP 法能够有效确定各指标的相对权重, TOPSIS 法则基于 ANP 权重, 综合考虑各个站点的具体表现, 计算各站点综合重要度值。2 种方法融合使用, 可更全面地评估地铁网络中各站点的重要性。计算步骤如图 2 所示, 其中, ANP 结构如图 3 所示。

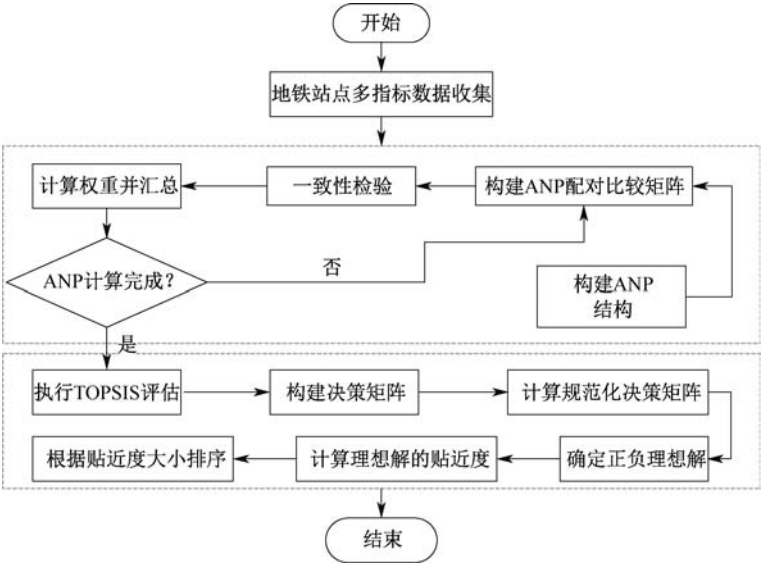


图 2 节点重要度计算流程

Fig. 2 Compute flow of node importance

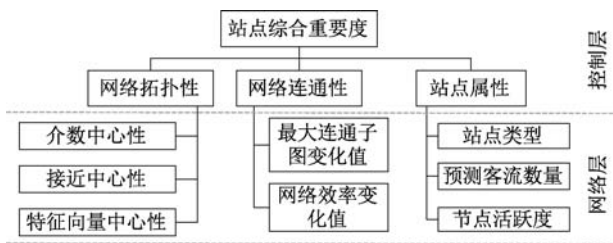


图 3 ANP 结构模型

Fig. 3 Structural model of ANP

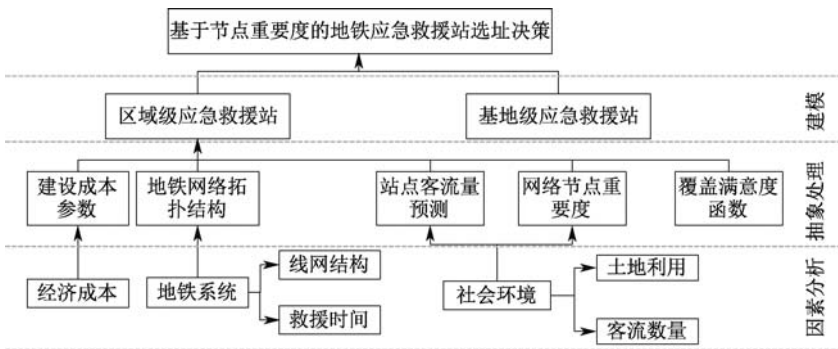


图 4 基于节点重要度的救援站选址模型构建思路

Fig. 4 Construction idea of rescue station siting model based on node importance

2.1 区域级应急救援站选址决策

2.1.1 模型假设

设 $I = \{i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为应急需求点集合, $J = \{j | j = 1, 2, \dots, m\} \subset I$ 为区域级应急救援站备选点集合。在此提出应急救援站选址分散原则,即相同等级的应急救援站在位置分布上应尽量分散,以避免出现 2 救援站位置重叠或相邻的情况,实现资源均衡分配。依据区域级应急救援站布局依托基础及应急救援相关理论分析研究,确定选址模型建立的假设条件如下。

假设 1:对于地铁应急救援站建设位置,从规划的角度考虑其网络位置设定在相对应的站点处,不考虑既有的应急服务设施情况,对具体方位不作细致探讨。

假设 2:地铁网络中所有站点同时属于应急需求点和应急救援站备选点,每个站点处设置有且仅有一种层级的救援站,且物资储备充足。

假设 3:突发事件发生时,地面救援和地下救援均沿地铁铺设线路行进,综合利用地铁线路和城市道路网络,灵活规划路径。

假设 4:考虑突发事件发生的小概率特性,救援时最靠近地铁站点的应急救援力量沿路径中的最短路线匀速赶往发生突发事件的地铁站点,忽略特殊情况下的道路中断、拥挤等影响。

2 地铁应急救援站选址建模及求解

依据《城市轨道交通运营期间安全评估规范》^[17],地铁线网应具备“站点-区域-基地”三级应急点结构。考虑到站区级救援站依托于站点自身,故主要针对区域级和基地级应急救援站的选址问题进行建模求解,模型构建思路如图 4 所示。

2.1.2 覆盖满意度函数

在实际应急服务中,应急救援站与需求点的距离会直接影响救援服务的及时性和质量。故使用随应急救援站运输时间变化的覆盖满意度函数 $F_i(t_{ij})$ 计算并反映不同位置救援服务的覆盖水平与响应时间之间的关系,分段点为应急救援站的理想服务时间半径 T_L 和最大服务时间半径 T_U ,计算公式为:

$$F_i(t_{ij}) = \begin{cases} 1, & d_{ij}/v < T_L \\ 1 - \left(\frac{d_{ij}/v - T_L}{T_U - T_L} \right)^\beta, & d_{ij}/v \in [T_L, T_U] \\ 0, & d_{ij}/v > T_U \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_{ij} 为区域级应急救援站备选点 j 到需求点 i 之间的最短距离, $m; v$ 为区域级应急救援车辆的平均运行速度, km/h ; t_{ij} 为区域级应急救援站备选点 j 到达救援需求站点 i 的运输时间, min ; β 为可调节参数,反映覆盖水平对响应时间的敏感程度,从而揭示时间满意度系数。

2.1.3 建设成本参数

一般来说,应急服务设施的建设成本与其选址距离市区中心的距离 d 有关,距离越近,建设成本越高。建设成本参数值 f^c ^[18] 表示为:

f^c = \varphi + \frac{\eta}{\mu + \lambda d^2} \tag{7}

式中： φ 为材料成本系数等基本建设费用； η 为标准
化系数； μ 、 λ 为敏感系数。

2.1.4 模型构建

为确保应急救援站选址的准确性和实用性,本
文将选址影响因素处理方式与应急救援站选址目标
相匹配。在满足救援需求的前提下提出 3 个目标
函数。

1) 覆盖范围内救援效率最高。在考虑平均应
急响应时间的基础上,最小化应急救援站的平均救
援时间,确保各应急救援站备选点对其覆盖范围
内需求点的救援服务效率最高。即

Z_1 = \min \left(T_0 + \sum_{j \in J} \frac{d_{\max,ij} x_j}{vn} \right) \tag{8}

式中： T_0 为区域级应急救援站面对突发事件的平均
应急响应时间,min,常数项； $d_{\max,ij}$ 为区域级应
急救援站备选点 j 到其覆盖范围内最远的需求点 i 之
间的距离,m； x_j 为 0~1 变量,区域级应急救援
备选点 j 是否被选作设置应急救援站,是取 1,否
取 0。

2) 线网覆盖程度最优。通过权衡站点的重要
度和应急救援站的服务能力以优化覆盖质量,保证
应急救援站备选点对其覆盖范围内各应急需求点
的覆盖水平总和最大。即：

Z_2 = \max \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \omega_i F_i(t_{ij}) z_i \right) \tag{9}

式中： ω_i 为应急需求点 i 的综合重要度权重系
数； z_i 为 0~1 变量,应急需求点 i 是否被应
急救援站备选点覆盖,是取 1,否取 0。

3) 建设成本最低。在满足应急救援站覆盖水
平和救援时间要求的基础上,最小化应急救援站
的建设成本,从而有效限制应急救援站建设数
量。即：

Z_3 = \min \sum_{j \in J} f_j^c x_j \tag{10}

式中： f_j^c 为区域级应急救援站备选点 j 的建设成本系
数。

4) 约束条件。首先,所有应急需求点均应至少
被一个应急救援站覆盖；其次,当且仅当需求点 i 被
应急救援站备选点 j 覆盖时,应急救援站 j 才能对
应急需求点 i 进行服务,且任意一个应急救援站均
无法覆盖网络中所有需求点；此外,设置的应
急救援站总数目不能多于 $q_{\max}$ 个；最后,应
急救援站 j 向需求点 i 提供救援服务时,救援时
间不得超过最大服务时间 T_U 。由以上条件得到
表达式为：

s. t. \begin{cases} \sum_{j \in J} z_i \geq 1, \forall i \in I \\ z_i \leq x_j, \forall i \in I, \forall j \in J \\ \sum_{j \in J} x_j \leq q_{\max} \\ z_i \left(\frac{d_{\max,ij}}{v} - T_U \right) \leq 0 \end{cases} \tag{11}

2.1.5 模型求解

覆盖选址类问题中,确定性多项式时间困难问
题 (Non-deterministic Polynomial-Time Hard, NP-
Hard) 问题所构建的选址模型多属于多目标优化模
型,这类问题的求解结果通常是一组解的集合,即
Pareto 最优解集。学者们通常采用启发式算法进
行多目标问题的近似求解。非支配排序遗传算法 II
(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-
II) 在一定程度上弥补了 NSGA 的不足,拓展了采
样空间,提高了算法的运算速度和鲁棒性。故选择
该算法求解区域级应急救援站的最优选址方案,算
法流程如图 5 所示。

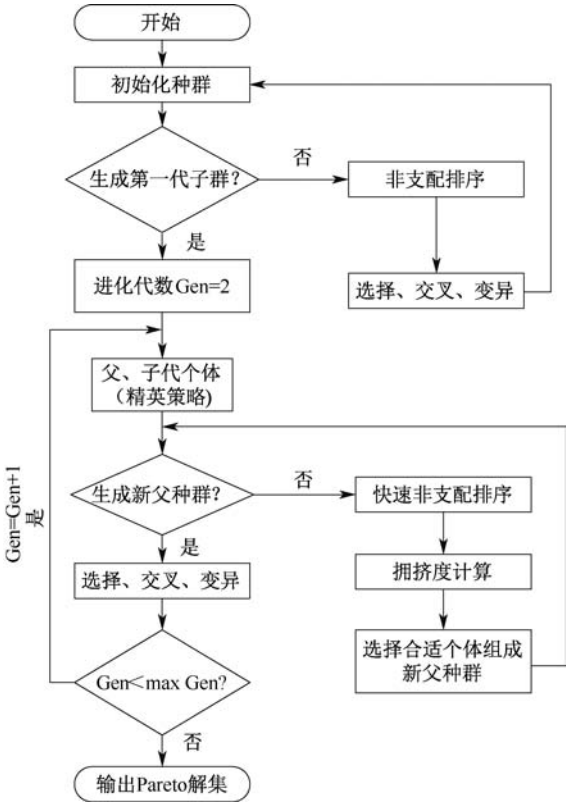


图 5 NSGA-II 流程

Fig. 5 Flowchart of NSGA-II

由于 Pareto 最优解集涉及建设成本、救援效率
与覆盖程度 3 个目标,在具体决策中,根据实际情
况和决策者偏好,从 Pareto 解集中选取一组最合
适的

方案作为应急救援站布局依托。文中以成本最优作为主要决策偏好。

2.2 基地级应急救援站选址决策

基地级应急救援站选址的求解主要依托于综合考虑整体情况后的枚举筛选,其整体位置的选择及覆盖效果与同研究条件下区域级应急救援站的选址方案有关。根据地铁网络中规划建设有停车场或车辆段的站点的数量和位置,确定基地级应急救援站备选站数量及具体位置。由于备选站数量较少,枚举法能够全面考虑备选站点的所有可能性,并通过合适的约束条件筛选出最优解,因此,采用枚举法求解。算法步骤如下:

第 1 步:确定枚举值范围,即基地级应急救援站备选站点编号数据,构建基地级应急救援站备选站集合 $J' = \{j' | j' = 1, 2, \dots, k\} \subset I$ 。

第 2 步:设定一个空的候选解集合用于存储符合约束条件的基地级应急救援站选址点。

第 3 步:判断约束条件,对每个枚举值 j' 检查是否满足所有约束条件:

- 1) 判断候选点 j' 是否与已确定的区域级应急救援站的选址点重合,若是则排除,若否则保留,以避免在同一站点编号位置处出现 2 种层级的应急救援站。
- 2) 判断候选点 j' 是否满足各应急救援站距离分散原则要求,若距离相近则排除,若满足则保留,以确保基地级应急救援站的覆盖范围更加均匀,避免局部区域过于密集。
- 3) 判断当前选择的应急救援站数量是否满足全覆盖的需求,以保障在满足救援覆盖要求的前提下,尽可能少地选取基地级应急救援站的数量,从而降低基地级应急救援站的建设成本和管理成本。
- 4) 若以上条件均满足,优先选取覆盖重要度值较多且自身重要度值较高的节点,将应急救援站编号纳入候选解集合中。

第 4 步:所有备选站点均遍历完毕时结束算法,得到满足约束条件的基地级应急救援站选址方案。

3 基于节点重要度的选址实例分析

为了验证文中所提出的理论研究在实践中的可行性和实用性,以西安市地铁规划网络为研究对象,进行实例验证,具体数据来源见表 1。将西安市地铁 3 期规划网络映射到矢量图中,如图 6 所示。

表 1 多源数据来源及内容说明

Table 1 Sources and description of multi-source data

类型	属性	来源
地铁站流量数据	西安市地铁路网 2023 年 8 月 21 日—9 月 17 日期间的各线路站点的每日客流量数据	西安市轨道交通集团有限公司
地铁路网结构等矢量数据	西安市地铁线路和站点的矢量数据文件	百度地图及数据网站
POI 数据	西安市地铁各站点地理坐标及类别信息等	百度地图应用程序接口
其他数据	西安市地铁站点周边接驳其他交通情况	大众点评、本地宝、安居客等网站

3.1 西安市地铁网络节点重要度值计算

采用 Python 编程计算地铁网络拓扑特征指标数据,包括介数中心性值、接近中心性值和特征向量值,以计算分析综合重要度。三者计算结果分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

通过 Python 编程将汇总的地铁网络数据转化为矩阵,依照前文计算所得的各节点各拓扑数据结果对节点依次排序,逐个移除网络节点的同时计算最大连通子图及网络效率变化值,直至网络瘫痪。图 10 为指标计算结果热图,其中色彩深浅表示计算结果所映射的站点重要程度,值越大即失效站点对网络连通性的影响越显著,该站点在网络中的重要性也较高。

结合西安市地铁网络的实际调研情况,得到其各站点类型的赋值统计数据见表 2。计算地铁站周边的 POI 数据,得到各站点的节点活跃度参数值,以此描述站点周边的社会经济特征。图 11 为节点活跃度结果热图,其中,深色色块表示节点活跃度参数值高、社会经济特征水平较高的地区,浅色色块则表示相反情况。

表 2 地铁网络部分站点类型数据

Table 2 Selected station type data for the subway network

站点类型	站点编号	站点个数
1	{ 1, 2, 3, 4, ..., 237, 238 }	167
2	{ 13, 24, 29, ..., 220, 224 }	17
3	{ 10, 12, 17, ..., 233, 239 }	56

研究选择高斯函数作为 GWR 模型的核函数,采用适应型带宽,以最小化 AIC_c 来选择带宽,得到最优带宽为 70。模型运算得到 GWR 模型的轨道站点进站客流量回归结果见表 3。根据实际获取的各

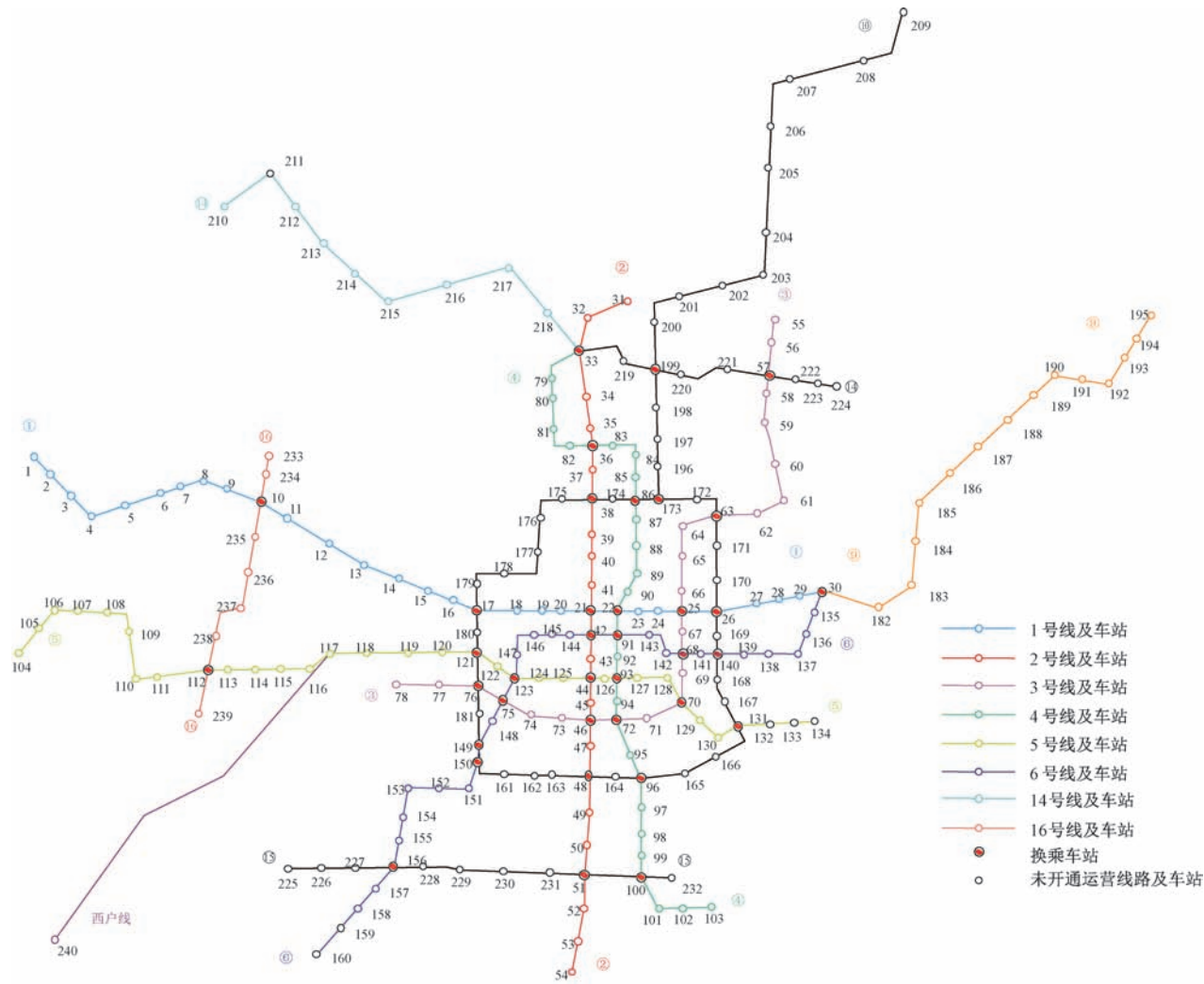


图6 西安市地铁规划网络矢量图

Fig. 6 Xi'an subway planning network vector map

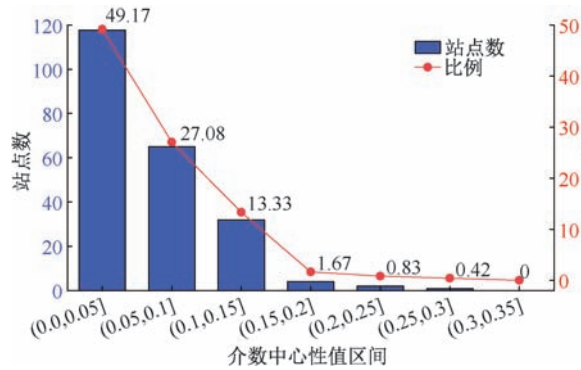


图7 站点介数中心性值区间对应的车站数量及占比
Fig. 7 Number and proportion of stations within intervals of betweenness centrality values

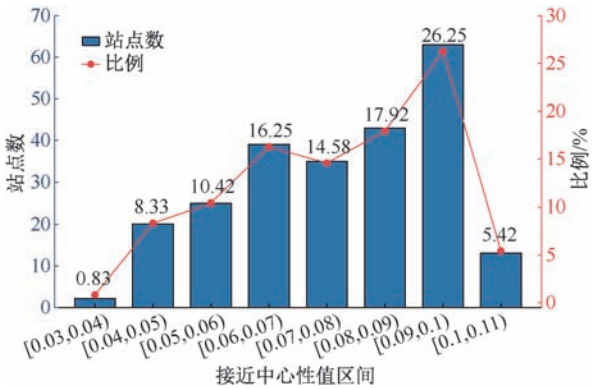


图8 站点接近中心性值区间对应的车站数量及占比
Fig. 8 Number and proportion of stations within intervals of closeness centrality values

影响因素的数据情况和车站周边属性来计算车站的客流规模。利用前期经过训练的 GWR 模型预测各站点客流量。综合上述计算结果,得到的西安市地铁网络各站点的计算节点重要度所需的全部指标取

值结果,采用 ANP 和 TOPSIS 组合方法计算地铁节点综合重要度和节点排序。根据设定的阈值和分级标准将站点的综合得分映射到 4 个不同的重要度级别,结果见表 4。

表 3 GWR 模型回归结果

Table 3 Regression results of GWR model

变量	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
常量	-168 516 130. 165	4 224 641 289. 852	-15 825 142 686. 303	1 218 361. 11	11 721 158 427. 216
Latitude	209 859. 391	30 315 792. 293	-73 392 471. 835	-332 945. 764	116 347 057. 038
Longitude	1 486 901. 707	31 376 088. 717	-90 165 545. 648	9 706. 352	108 863 525. 476
L	58 909. 568	261 642. 165	-206 190. 932	2 378. 096	1 302 629. 774
WFA	-0. 537	2. 551	-12. 708	0. 005	1. 170
H'	3 120 256. 414	11 299 289. 166	-15 212 345. 320	118 078. 390	54 420 625. 406
D	27 537. 578	163 450. 085	-568 774. 910	12 576. 100	485 804. 271

注:模型运算中将输入的地理坐标转换为平面投影坐标,并根据空间权重对各观测点进行局部回归估计。回归结果中 Latitude(纬度)和 Longitude(经度)为模型对这 2 个空间位置变量所估计的局部回归系数的统计特征,表示在不同空间位置上,变量对因变量即地铁站客流量的影响方向与强度,单位为客流人次/m。系数的正负值代表变量在该位置对客流的促进或抑制作用,其绝对值大小反映影响程度的强弱。

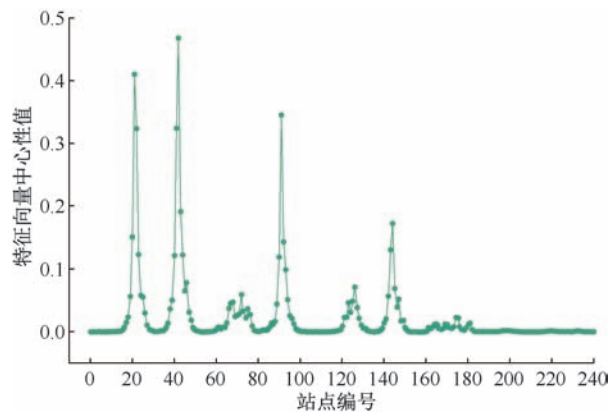


图 9 西安市地铁各站点网络特征向量中心性值
Fig. 9 Eigenvector centrality values of each station in Xi'an subway network

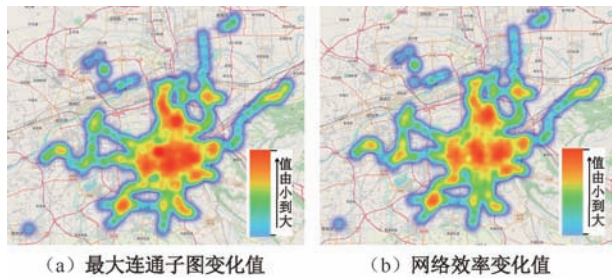


图 10 指标计算结果热图
Fig. 10 Heatmap of index calculation results

表 4 部分节点重要度等级评估结果

Table 4 Assessment results of partial node importance levels				
类别	地铁网络节点集合	数量	等级	描述
1	{21, 22, ..., 123, 149}	19	I	极为重要
2	{10, 12, ..., 225, 233}	53	II	重要
3	{11, 15, ..., 217, 239}	107	III	较为重要
4	{1, 2, ..., 237, 238}	61	IV	普通

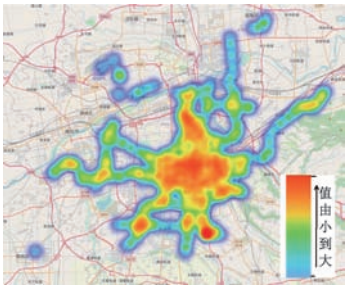


图 11 节点活跃度结果热图
Fig. 11 Heatmap of node activity results

3.2 应急救援站选址模型求解

3.2.1 区域级应急救援站选址模型求解

模型参数确定:假设区域级应急救援站的事故发生到启动事故响应的时间 T_0 为 2 min;基于获取的各节点经纬度坐标数据,结合救援车辆行驶速度计算任意 2 节点间的行驶时间,车辆平均速度设为 40 km/h。参考城市应急管理的要求和经验,划分各级应急需求点所对应的服务时间见表 5。并据此计算得到各站点选为区域级应急救援站备选点时对其他站点的覆盖水平。此外,为降低建设成本,依据文献[18-19],本文相关参数取 $\varphi = 0.7$, $\eta = 0.3$, $\mu = 1$, $\lambda = 0.1$ 。

表 5 应急需求点分级及其理想服务时间和最大服务时间

Table 5 Emergency demand point classification and its ideal service time and maximum service time		
应急需求点分级	理想服务时间 T_L/min	最大服务时间 T_U/min
I 级	5	10
II 级	10	15
III 级	15	20
IV 级	20	25

结合前人研究经验^[20-21],在分析试算实例数据的基础上确定算法参数设置:交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,种群大小为 50,最大迭代次数为 300。根据上述数据,使用 NSGA-Ⅱ 算法求解基于节点重要度的区域级应急救援站选址问题,并获取 Pareto 最优解集。

以成本最优作为主要决策偏好,当多个解的成本相同时,优先考虑覆盖程度最优的方案。基于此决策逻辑,选定一组具有较好性能的解作为最终选

址方案,其目标函数值求解结果分别为 $Z_1 = 5.438$, $Z_2 = 57.243$, $Z_3 = 2\,091.061$,最优解集记为 $J = \{j|j = 10, 25, 33, 44, 58, 86, 100, 112, 121, 131, 156, 190, 205, 213, 240\}$ 。由于规划网络中西户线上的站点 240 地处位置较远,单独依靠其他站点群救援难以满足时效性要求,故即使设置在该站点的应急救援站覆盖范围内没有其他需求站点,其物资储备也应较自身站点级的储备量略高,以满足突发事件的应急需求,具体如图 12 所示。

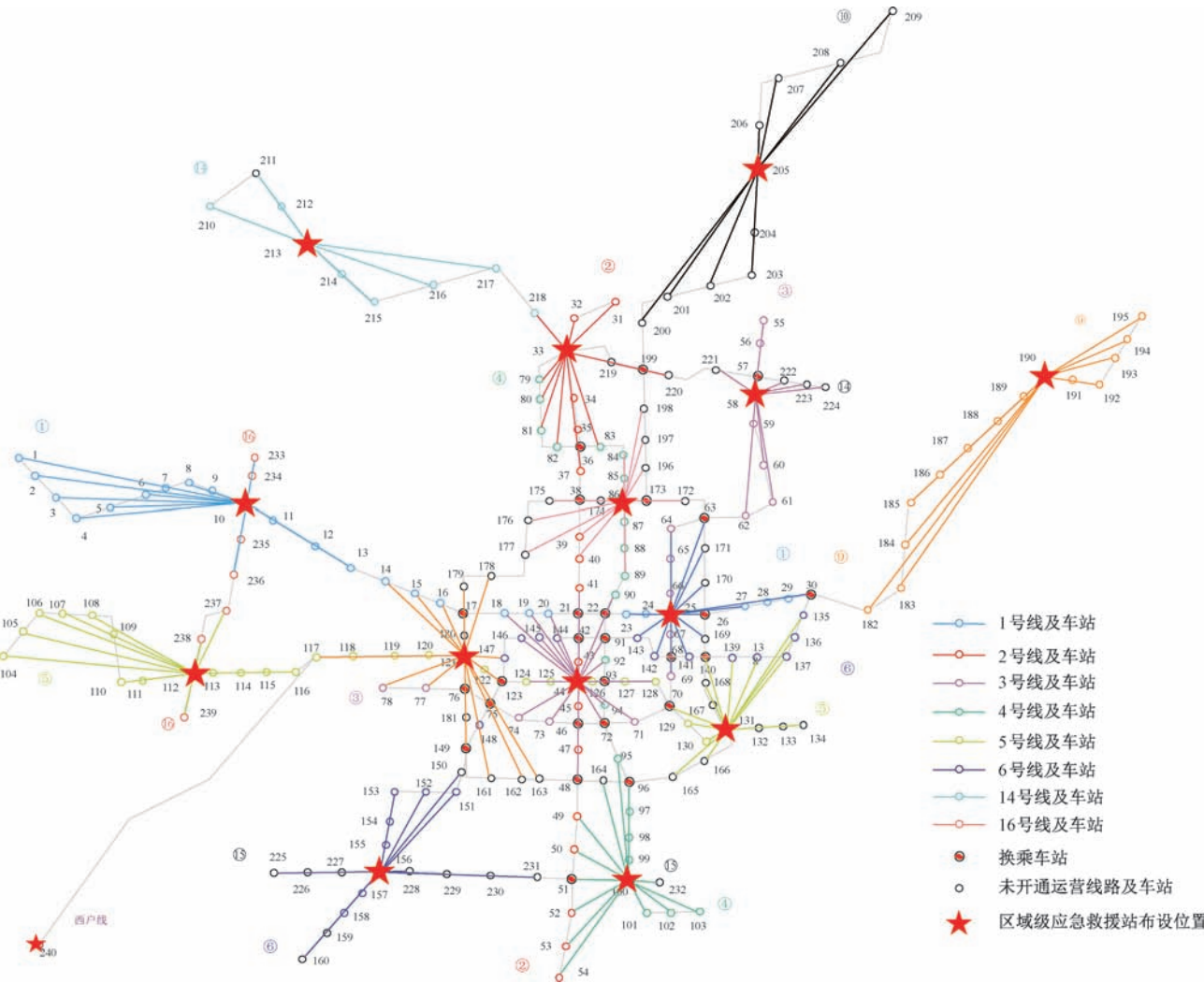


图 12 考虑节点重要度的区域级救援站布局及服务范围

Fig. 12 Layout and service coverage of regional-level rescue stations considering node importance

3.2.2 基地级应急救援站备选点选择

对西安市地铁规划路网中建设有车辆段、停车场及综合基地的站点编号,同时综合考虑一些特殊情况,如针对 2 个站点同时满足建有停车场或车辆段的条件且地理位置相近的情况,通过比较综合重要度值来选择站点。最终得到基地级应急救援站备选点的集合为 $J' = \{j'|j' = 12, 30,$

$31, 52, 58, 117, 131, 207, 225\}$ 。在已获得区域级应急救援站选址结果的基础上,结合节点重要度值,采用枚举法进行基地级应急救援站选址求解。使用 Python 编程语言对所有备选站点进行逐一遍历和筛选,结合决策者偏好得到最优选址方案为节点 12, 30, 31, 225, 其布局与服务范围情况如图 13 所示。

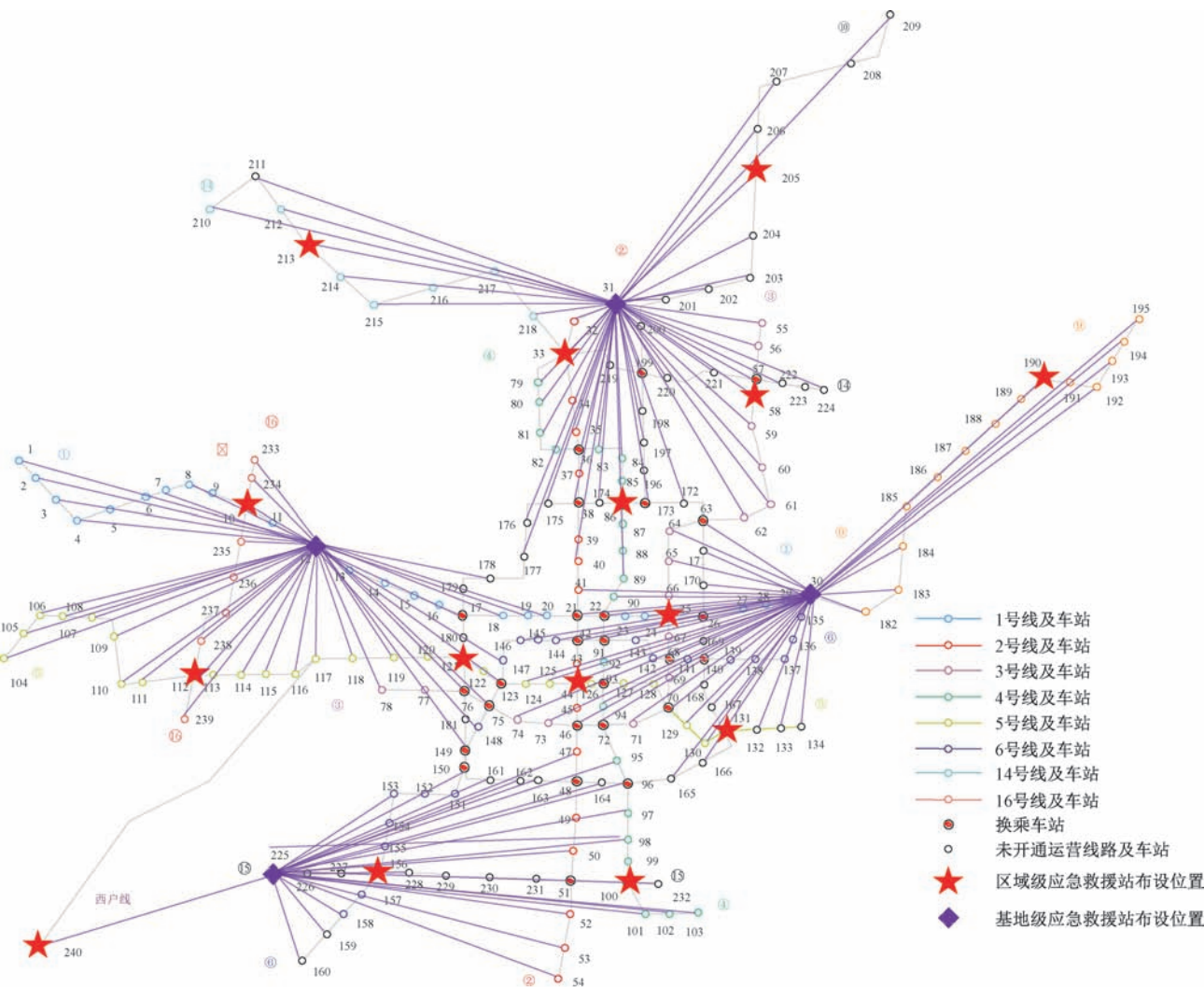


图 13 考虑节点重要度的基地级救援站布局及服务情况

Fig. 13 Layout and service status of base-level rescue stations considering node importance

3.3 选址结果对比分析

为验证文中考虑节点重要度的地铁应急救援站选址方案的效果,在不考虑节点重要度的情况下求解模型,并作以下对比分析。

参数设置上,各站点综合重要度均赋值为 1,覆盖满意度函数的敏感系数 β 取值为 1,其他各参数条件保持不变。此时,求得未考虑节点重要度时的区域级应急救援站选址模型的 Pareto 最优解集。在同决策者偏好下选出与考虑节点重要度的选址方案的设施数量相同且建设成本相近的方案的目标函数值为 $Z_1=5.557, Z_2=62.640, Z_3=1997.939$,共设置 15 个区域级应急救援站,选址结果最优解集记为 $J=\{j|j=10, 25, 33, 42, 57, 87, 100, 112, 121, 131, 156, 190, 214, 205, 240\}$ 。其中,西户线上站点 240 情况与前文结果分析相同。基于该区域应急救援站

选址结果,同样采用枚举法求解得到同决策者偏好下的最优选址方案为节点 30, 31, 52, 117。对比 2 种区域级应急救援站选址方案,可得结论如下:

1) 从目标函数值的求解结果来看,考虑节点重要度时,成本节省约 2.19%,救援效率提高约 9.43%,覆盖程度优胜约 4.66%。

2) 从选址方案来看,2 种方案选择的应急救援站数目相同,但具体布设位置存在差异。考虑节点重要度的选址结果中,方案选中的可设置区域级应急救援站的位置包括周边有停车场或车辆段的站点(如站点 58、131 等)、节点综合重要度值较高的站点(如站点 121 等),以及换乘站(如站点 100 等)等特殊站点。而未考虑节点重要度的选址结果中,应急救援站布设位置分布未包含周边设有停车场或车辆段的站点,且依赖于换乘站位置布设的应急救援站数目也相对较少。

综上所述,文中所构建的考虑节点重要度的应急救援站选址模型更具综合性,其求解方案能够量化不同车站的重要程度差异,更好地覆盖地铁网络中综合重要度值较高的节点,满足应急救援的时效和覆盖要求,减少突发事件造成的损失。

4 结 论

- 1) 构建的节点重要度评价体系兼顾了网络拓扑结构、网络连通性及站点属性,为重要节点的识别和救援站的选址布局提供了科学依据。
- 2) 构建的以效率、公平和经济为多目标,考虑节点重要度的应急救援站选址模型,通过实例分析验证其合理性与实用价值。同时,与不考虑节点重要度对比,考虑节点重要度的选址方案显著增强了

节点的覆盖能力和资源配置效率,为突发事件的快速响应提供了可靠支撑。

- 3) 构建的 GWR 模型,以预测客流作为客流数据。其结果虽可以作为参考工具,但其对地铁系统局部微变及特殊工况的响应存在局限,导致预测值与实际客流产生偏差。因而在地铁规划建设中,需要动态适应性更强的模型深化客流精细化研究。
- 4) 基于静态网络数据求解地铁应急救援站选址模型,未考虑交通的动态变化情况,对于选址结果的稳定性以及对极端事件的应对能力有所影响。未来研究需进一步融合多制式线网拓扑与实时交通人群动态,构建选址、分配和运输协同优化框架,并借助智能算法提升大规模整数规划求解能力,以增强模型的精确性、系统性与应用价值。

参 考 文 献

[1] 施润妮,朱双凯,张艳玲.城市轨道交通应急救援站设置研究综述[J]. 产业创新研究, 2021(18): 113-115.

[2] XU Lei, WANG Chuanjiang, DONG Wei, et al. A method for optimal allocation of regional rail transit emergency resources based on resource sharing [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1624: DOI: 10.1088/1742-6596/1624/4/042037.

[3] MOHRI S S, AKBARZADEH M, MATIN S H S. A hybrid model for locating new emergency facilities to improve the coverage of the road crashes [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2020, 69: DOI:10.1016/j.seps.2019.01.005.

[4] TRIVEDI A, SINGH A. A hybrid multi-objective decision model for emergency shelter location-relocation projects using fuzzy analytic hierarchy process and goal programming approach [J]. International Journal of Project Management, 2016, 35(5): 827-840.

[5] 张宇,韩梅,汤兆平,等.多层次协同的地铁应急救援基地选址优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(4): 161-171.

ZHANG Yu, HAN Mei, TANG Zhaoping, et al. Multi-level collaborative site optimization for subway emergency rescue base [J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(4): 161-171.

[6] 路庆昌,崔欣,谢驰,等.城市轨道交通网络关键站点识别方法对比与分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3): 18-25.

LU Qingchang, CUI Xin, XIE Chi, et al. Comparison and analysis of identification methods for critical stations in urban rail transit networks [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 18-25.

[7] 王梓行,姜大立,漆磊,等.基于冗余度的复杂网络抗毁性及节点重要度评估模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(3): 78-85.

WANG Zihang, JIANG Dali, QI Lei, et al. Complex network invulnerability and node importance evaluation model based on redundancy [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2020, 17(3): 78-85.

[8] DU Zhouyang, TANG Jinjun, QI Yong, et al. Identifying critical nodes in metro network considering topological potential: a case study in Shenzhen city-China [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 539: DOI:10.1016/j.physa.2019.122926.

[9] 梁青槐,柴树山,钟思敏,等.城市轨道交通站点网络结构综合重要度识别[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(9): 66-71.

LIANG Qinghuai, CHAI Shushan, ZHONG Simin, et al. Identification of comprehensive importance of urban transit stations in network structure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 66-71.

[10] 孙剑萍,胡义,汤兆平.考虑节点重要度的城市轨道交通应急救援点选址研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(1): 15-22.

2024, 20(9):173-180.

SUN Jianping, HU Yi, TANG Zhaoping. Study on site selection of emergency rescue points in urban rail transit considering node importance [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(9):173-180.

[11] 孙晓黎, 朱才华, 马超群. 考虑步行影响范围的城市轨道交通客流需求预测[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(4): 133-140.

SUN Xiaoli, ZHU Caihua, MA Chaoqun. Passenger flow demand forecast of urban rail transit considering walking influence range[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(4): 133-140.

[12] 袁发涛. 基于多源数据的轨道站点客流量预测模型[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

YUAN Fatao. Passenger flow forecast model of rail station based on multi-source data [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

[13] 岂常禄, 胡昊. 基于混合地理加权回归的城市轨道交通站点客流预测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7):1 903-1 909.

QI Changlu, HU Hao. Research on ridership forecast of urban rail transit station based on mixed geographic weighted regression [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7):1 903-1 909.

[14] LIU Xiaoping, NIU Ning, LIU Xingjian, et al. Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 32(4): 738-756.

[15] 陈刘瑜, 李希建, 毕娟, 等. 基于 AHP-TOPSIS 的冲击型煤与瓦斯突出倾向性预测[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4):47-52.

CHEN Liuyu, LI Xijian, BI Juan, et al. Prediction of coal-gas outburst induced by rock-burst tendency based on AHP-TOPSIS [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(4):47-52.

[16] 黄亚江, 李书全, 李益铎, 等. 基于 DEMATEL-ISM-ANP 的地铁运营安全韧性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 171-177.

HUANG Yajiang, LI Shuquan, LI Yixin, et al. Comprehensive evaluation on subway operation safety resilience based on DEMATEL-ISM-ANP [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 171-177.

[17] 交通运输部. 城市轨道交通运营期间安全评估规范(交办运(2023) 58 号) [Z]. 2023-09-22.

[18] 张星玄. 基于城市交通网络节点重要性的应急设施选址研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.

ZHANG Xingxuan. Research on emergency facility location based on the node importance of urban traffic network [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.

[19] 曹疏, 胡锐, 郭兆能, 等. 城市轨道交通应急资源选址和配置方法研究[J]. 交通运输研究, 2016, 2(4):54-61.

CAO Liu, HU Rui, GUO Zhaoneng, et al. Emergency resource location and distribution of urban rail transit [J]. Transport Research, 2016, 2(4):54-61.

[20] 陈博文, 陈建岭. 基于改进多目标遗传算法的电动汽车换电站选址研究[J]. 物流研究, 2024(1):36-40.

CHEN Bowen, CHEN Jianling. Research on the location planning of electric vehicle battery swap stations based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. Logistics Research, 2024(1): 36-40.

[21] 付德强, 王旭, 张伟. 基于 NSGA-II 的应急储备库多目标选址决策模型及算法研究[J]. 运筹与管理, 2014, 23(4):64-69.

FU Deqiang, WANG Xu, ZHANG Wei. Decision model of the multi-objective supplies reserve storage location problem based NSGA-II [J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(4): 64-69.



作者简介: 雷斌 (1978—),男,陕西榆林人,博士,教授,主要从事道路与城市轨道交通工程等方面的研究。E-mail:leibin@xauat.edu.cn。