

基于城市轨道交通的应急物流设施点选址研究

施严挺, 刘巍巍, 王 果, 王 洋

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年2月18日; 录用日期: 2025年3月26日; 发布日期: 2025年4月3日

摘 要

城市轨道交通以其高速、大容量和广泛覆盖的网络, 成为应急物流中的关键运输工具。本文致力于通过优化选址策略, 充分利用城市轨道交通的这些优势, 以提升应急物流的效率和响应速度。本文考虑建造成本、轨道交通运输时间、轨道交通运输量、物资储存量、服务覆盖范围等因素, 建立了具有轨道交通特性的选址目标函数, 旨在最小化应急物流设施建造成本和配送时间, 同时最大化服务水平和满意度目标。然后采用AHP和NSGA-II方法结合GIS数据分析对模型进行求解优化。最后以上海市为例, 验证模型和算法的实用性及有效性。结果表明, 设施点布局通过NSGA-II算法优化, 实现了求解时间、服务覆盖范围增加、设施点成本节约及鲁棒性评分的全面优化, 基于城市轨道交通的应急物流设施点选址具有较强的应用价值。

关键词

城市轨道交通, 应急物流, 设施点选择, NSGA-II算法优化

Research on Site Selection of Emergency Logistics Facilities Based on Urban Rail Transit

Yanting Shi, Weiwei Liu, Guo Wang, Yang Wang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 18th, 2025; accepted: Mar. 26th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

Urban rail transit, with its high speed, large capacity, and extensive network coverage, has become

文章引用: 施严挺, 刘巍巍, 王果, 王洋. 基于城市轨道交通的应急物流设施点选址研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 206-217. DOI: 10.12677/orf.2025.152077

a crucial transportation mode in emergency logistics. This study aims to enhance the efficiency and responsiveness of emergency logistics by optimizing location strategies and fully leveraging the advantages of urban rail transit. Considering factors such as construction costs, rail transit time, rail transport capacity, material storage capacity, and service coverage, we establish a location objective function with specific rail transit characteristics. The objective is to minimize the construction costs and delivery time of emergency logistics facilities while maximizing service levels and satisfaction targets. The model is then solved and optimized using a combined approach of AHP and NSGA-II methods, integrated with GIS data analysis. Finally, taking Shanghai as a case study, we verify the practicality and effectiveness of the model and algorithm. The results show that the optimization of facility point layout by NSGA-II algorithm can realize the comprehensive optimization of solution time, service coverage increase, facility point cost saving and robustness score, and the emergency logistics facility point location based on urban rail transit has strong application value.

Keywords

Urban Rail Transit, Emergency Logistics, Facility Point Selection, NSGA-II Algorithm Optimization

Copyright © 2025 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. 引言

城市轨道交通系统具备极高的运载能力，能够在繁忙时段短时间内运送大量乘客，可以缓解城市交通压力、减少交通拥堵[1]。城市轨道交通的优势不仅表现在常规出行中，在应急物流中发挥了很大作用，有别于其他交通工具的是，地铁系统因其封闭和独立的运营特性[2]，在突发公共事件时具有更高的可靠性，城市轨道交通能快速、安全地为救援队伍和救援物资的运输提供通道[3]。其快速穿行于城市地下或高架之间，能够规避受灾严重的区域，保证物资在第一时间被送达最需要的地方[4]。因此，结合城市轨道交通特点与应急物流设施点选址的研究，有利于构建现代城市应急管理体系，其成果极大提升城市面对突发灾害时的响应速度和救援效率，是对城市可持续发展与安全保障能力的有力增强。

在现阶段的研究中，蔡冬雪等[5]注重多层次协同布局问题，基于情景分析构建了一个双目标应急物流设施点选址模型，通过 MATLAB 计算，旨在实现总运行成本最低和运输消耗时间最小化。张国富[6]分析了多种应急救援物资、多存储点和多发放点的鲁棒优化模型，为应急物流网络的稳健性提供了数学保障。Changjiang Z 等[7]在地铁系统非高峰时段进行货物运输的选址优化研究中，利用了数据和实地考察来分析物流系统的可行性。他们提出的改进的 P-中值模型，综合了关键影响因素，并应用最短路径算法以降低运输成本。Rikalović A 等[8]利用 GIS 技术进行数据采集和空间分析，为物流中心的选址提供了多个备选方案。罗来韶[9]通过分析设施变更数量与需求覆盖之间的关系，对比分析了动态选址模型和静态选址模型的差异。周金鹏[10]则借助熵权法的 TOPSIS 模型，对地铁站点的中转能力进行了综合排序，并建立了一个考虑容量约束的最大覆盖选址模型，采用随机贪婪自适应搜索算法对其进行求解。他还建立了一个含有容量约束的轴点选址分配模型，旨在优化地铁站点布局，提高地铁网络的运营效率。张方耀[11]在其研究中，引入了需求和运输成本两个不确定性因素，研究了两个混合不确定性条件下的鲁棒优化设施选址模型。这种模型有助于提高应急物流配送中心的适应性，确保在面临不确定性因素时仍能高

效运作。

这些研究在理论方法和实际应用方面都取得了显著成果，为应急物流设施选址提供了有力的理论支持和实践指导。然而，由于应急物流环境的复杂性和不确定性，缺乏对城市轨道交通特性的考虑以及案例研究的局限性，仍需要进一步研究以解决实际应用中可能遇到的新问题和挑战。本文考虑建造成本、轨道交通运输时间、轨道交通运输量、物资储存量、服务覆盖范围等因素，建立了具有轨道交通特性的选址目标函数，旨在最小化应急物流设施建造成本和配送时间，同时最大化服务水平和满意度目标并采用 AHP 和 NSGA-II 方法结合 GIS 数据分析优化结果。

2. 问题描述与建模

2.1. 问题描述

在城市轨道交通系统加速城市化进程的同时，也为应急物流提供了新的解决方案。设施点的合理选址，直接影响到救援时间缩短和资源快速高效调配。因此，从实际应急需求出发，充分考虑城市轨道交通特性，实现应急响应能力的最大化。模型将轨道交通站点视为潜在选址点，考虑其地理位置和交通网络中的位置，确保选址点与轨道交通网络紧密相连。模型评估站点对周边区域的可达性和便利性，包括距离、换乘便捷程度和运行频率，以提升服务效率。此外，模型分析轨道交通线路的网络结构，包括线路长度、方向和换乘关系，确保选址点能够通过网络高效连接城市其他区域。同时，模型还会关注换乘节点的优化，以及进行成本效益分析，综合考虑建设、运营和维护成本，从而在确保经济可行性的同时，最大化轨道交通对选址点的正面影响。

2.2. 模型构建

选址目标函数旨在最小化应急物流设施建造成本、配送时间，同时最大化服务水平和满意度目标。如式(1)所示。

$$\text{Minimize } Z = C_{\text{build}} + \alpha \times S_{\text{penalty}} + \beta \times M_{\text{penalty}} + \gamma \times T_{\text{penalty}} + \delta \times T_{\text{rail}} + \epsilon \times D_{\text{rail}} \quad (1)$$

式中， Z 为目标函数，代表需要最小化的总成本或总费用； C_{build} 为所有选中的设施点建设成本总和； α 为服务水平惩罚系数； S_{penalty} 为服务水平惩罚项； β 为满意度惩罚系数； M_{penalty} 为满意度惩罚项； γ 为时间效率惩罚系数； T_{penalty} 为时间效率惩罚项； δ 为轨道交通时间效率奖励系数； T_{rail} 为通过城市轨道交通系统服务时间； ϵ 为轨道交通可达性奖励系数； D_{rail} 为设施点到最近轨道交通点的距离。

其中，服务水平惩罚项 S_{penalty} ，如式(2)所示。

$$S_{\text{penalty}} = \sum_{i=1}^N (S_i - S_{\min}) \quad (2)$$

式中， S_i 是第(i)个设施点的服务水平； $S_{\min}$ 是服务水平的最小接受标准，即所有设施点必须达到或超过的服务水平； α 是服务水平惩罚系数，它决定了服务水平不足时的惩罚程度。

满意度惩罚项 M_{penalty} ，如式(3)所示。

$$M_{\text{penalty}} = \sum_{i=1}^N (M_i - M_{\text{sat}}) \quad (3)$$

式中， M_{penalty} 是总的满意度惩罚成本； M_i 是第(i)个设施点的顾客满意度得分； M_{sat} 是顾客满意度的最小接受标准，即所有设施点必须达到或超过的满意度水平； β 是满意度惩罚系数，它决定了顾客满意度不足时的惩罚程度。

时间效率惩罚项 T_{penalty} ，如式(4)所示。

$$T_{\text{penalty}} = P_0 \times \left(\frac{T_{\text{actual}}}{T_{\text{planned}}} \right)^{\gamma} \quad (4)$$

式中, P_0 是一个基准惩罚成本或初始惩罚系数; T_{actual} 是实际完成项目所需的时间; T_{planned} 是计划完成项目所需的时间; γ 是一个正的惩罚系数, 它决定了时间延误对惩罚成本的影响程度。

通过城市轨道交通系统服务时间 T_{rail} , 如式(5)所示。

$$T_{\text{rail}} = K \times (1 - E_{\text{service}}) \quad (5)$$

式中, K 是一个固定的惩罚系数, 它决定了服务效率每下降一个单位时, 惩罚成本的增加量; E_{service} 是服务效率指数。

约束条件, 服务覆盖约束: 每个需求点 j 必须至少有一个设施点 i 提供服务, 如式(6)所示。

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (6)$$

式中, Y_{ij} 为需求点 j 是否由设施点 i 服务的二元变量。

物资储备约束, 设施点 i 的物资储备量 F_i 必须满足其服务的需求点 j 的需求量, 如式(7)所示。

$$\sum_{j \in J} D_j \cdot Y_{ij} \leq F_i, \forall i \in I \quad (7)$$

式中, D_j 为需求点 j 的物资需求量; Y_{ij} 为需求点 j 是否由设施点 i 服务的二元变量; F_i 为设施点 i 的物资储备量; j 为所有需求点的集合; i 为所有设施点的集合。

运输时间约束, 设施点 i 到需求点 j 的运输时间 T_{ij} 不能超过需求点的紧急度 V_j , 如式(8)所示。

$$T_{ij} \leq V_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

覆盖半径约束, 设施点的覆盖半径 R 必须足够覆盖其服务的需求点, 如式(9)所示。

$$R_i \geq \max_{j \in J} \sqrt{(P_i - D_j)^2 + (Q_i - E_j)^2} \quad \forall i \in I \quad (9)$$

式中, P_i , Q_i , D_j 和 E_j 是设施点 i 和需求点 j 的地理位置坐标。

运输效率约束, 物资运输量 W 不能超过轨道交通的运输效率 L , 如式(10)所示。

$$W \leq L \cdot T_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (10)$$

式中, T_{ij} 为设施点(i)到需求点(j)的响应时间; t_{max} 为最大允许的响应时间。

3. 模型求解

3.1. 算法设计

在对上海市基于城市轨道交通的应急物流设施点进行选址分析过程中, 本文采用了综合考虑地理信息系统(GIS)数据分析和多目标优化算法的策略, 旨在达成成本最低化同时确保覆盖率最大化的双重目标。算法设计涉及 NSGA-II 算法优化技术, 以期找到一个既有效又高效的求解方案。

在模型求解方面, 在应用 NSGA-II 算法时, 可以将上述模型求解流程整合到算法中, 具体步骤如下:

(1) 初始种群生成

使用随机方法生成一个初始种群, 每个种群代表一个潜在的解决方案。

(2) 评估种群

对种群中的每个个体进行评估, 评估标准包括建设成本、运营成本和覆盖效果等。

(3) 非支配排序

根据个体的评估结果，对种群进行非支配排序，确定每个个体的 Pareto 前沿位置。

(4) 拥挤度计算

计算每个个体的拥挤度，以衡量其占据解空间的位置。

(5) 选择过程

结合非支配排序和拥挤度，选择适应性好的个体进入下一代种群。

(6) 交叉和变异

对选出的个体进行交叉和变异操作，生成新的种群。

(7) 重复过程

重复步骤 2 到 6，直到达到终止条件，如达到最大迭代次数或解的质量要求。

输出最优解：最终输出非支配排序中最前的个体，作为问题的解。

通过上述流程，NSGA-II 算法可以在多目标优化的框架下找到一组满意的解决方案，这些解在 Pareto 前沿上，并且能够满足应急物流设施点选址的各种约束条件。

按照 NSGA-II 算法的要求进行改写，并进行 NSGA-II 参数设置，NSGA-II 算法适用于多目标优化问题，并且能够处理复杂的约束条件。在 NSGA-II 中，将适应度函数设计为综合考虑多个目标的函数，包括应急物流设施的地理分布、与重要基础设施的距离、城市轨道交通网络接入点的便捷性以及成本和时间响应等因素。

对于 NSGA-II 算法的参数设置，考虑以下几点：

种群规模：根据问题的复杂性确定，可以设置为 50 到 200 之间。

交叉和变异概率：根据问题的特点和需求进行调整，通常交叉概率在 0.6 到 1 之间，变异概率在 0.05 到 0.2 之间。

非支配排序阈值：用于确定 Pareto 前沿的阈值，可以根据问题的特点调整。

拥挤度计算方法：选择合适的拥挤度计算方法，以确保种群在解空间中均匀分布。

通过调整 NSGA-II 算法的参数，获得一组满足多目标的满意解，这些解在 Pareto 前沿上，并能够满足上海市城市轨道交通系统中的应急物流需求。为了验证算法效果，本文基于上海轨道交通网络的实际情况，通过 GIS 数据获取每个潜在点位的交通便捷度、配送时间以及成本投入等信息，以实现对应急资源分配和路径安排的优化。

3.2. 影响因素权重分配

在构建设施点选址数学模型的过程中，明确选址的具体目标 and 需求，在于提升城市轨道交通应急物流网络的高效运作和快速响应能力。为此，开始收集和分析现有的轨道交通数据，这些数据构成了模型构建的基础。在评价标准的确立上，采用多层次分析法(AHP)，结合城市轨道交通的运输优势，明确多个关键因素，如式(11)所示，通过相对权重和重要性评分来确定各因素在整个系统中的总重要性。

$$w_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (11)$$

式中， w_{ij} 为第 i 个元素相对于第 j 个元素的相对权重； r_{ij} 为第 i 个元素相对于第 j 个元素的相对重要性评分，评分取值范围是 1 到 9，其中 1 表示两个元素同等重要，9 表示一个元素比另一个元素重要 9 倍； $\sum_{j=1}^n$ 为对第 i 个元素的所有相对重要性评分进行求和， n 表示总共有多少个元素需要进行比较，这个求和的结果代表第 i 个元素在整个系统中的总重要性。

经过计算后得知设施点选址的影响因素如表 1 所示。

Table 1. Influencing factors of facility site selection
表 1. 设施点选址的影响因素

影响因素	指标代码	数量化标准	目标层	准则层	权重	优劣分析
覆盖范围	S01	半径 10 km 内	A	B1	0.18	优先保障核心区域覆盖，考虑上海城市规模和人口密度
应急物流中心到需求点的最大距离	T02	不超过 15 km	A	B2	0.15	确保迅速响应需求点，考虑到上海的交通网络和拥堵情况
应急物流中心到需求点的平均距离	S03	平均距离 8 km	A	B2	0.12	均衡服务覆盖和成本，考虑到上海的城市规模和交通条件
应急物流中心到需求点的平均时间	T04	平均时间 20 min	A	B2	0.10	减少灾害响应时间，考虑到上海的交通状况
不理想状况下应急物流中心到需求点的最长时间	T05	最长不超过 45 min	A	B2	0.08	减少极端情况下的风险，为突发事件预留更多反应时间
应急物流中心靠近交通枢纽的程度	L06	距最近交通枢纽不超过 5 km	A	B3	0.15	提高物流效率，靠近交通枢纽利于快速集散货物
应急物流中心与需求点间交通的协调情况	T07	能够绕开主要交通干线	A	B3	0.12	避免交通干扰，特别是在高峰时段
气象条件	E08	可承受 6 级风力	A	B4	0.06	确保恶劣天气下的运行，上海地处沿海，风力较大
地形条件	G09	平坦且易于施工的地形	A	B4	0.07	降低建设和维护难度，上海多平原地形
建造成本	C01	成本不超过 2000 万元	A	B5	0.05	控制初始投入，考虑到上海的高成本
运营成本	O02	年运营成本不超过 500 万元	A	B5	0.06	实现长期的成本效益，上海市场运营成本较高
物流成本	L03	单位成本不超过 2 元/km	A	B5	0.08	保障物流成本可控，上海物流成本相对较高
可持续发展性	S04	能源利用率提升 20%	A	B6	0.05	提高能源使用效率，符合绿色可持续发展要求
环境保护要求	E05	符合国家标准	A	B6	0.04	响应绿色物流政策，上海对环保要求较高
人口因素	P06	满足 50 万人口服务需求	A	B7	0.05	基于人口密度设计选址，上海人口众多
应急物流中心功能的完善性	F08	实现多样化服务	A	B8	0.10	提高应急响应能力，满足不同应急需求
应急物流中心的信息化发展程度	I09	信息化水平达到 4.0 水平	A	B8	0.12	优化物流信息系统，提高应急响应效率
应急物流中心服务的可达性	F10	服务点覆盖率达到 95%	A	B8	0.10	提高服务覆盖和便利性，满足高人口密度的需求
国土资源利用率	F19	土地使用效率达到 85%	A	B9	0.04	合理利用土地资源，上海土地资源紧张
国家政策	F20	符合城市规划和国家法规	A	B9	0.03	确保政策依法合规，符合上海的城市规划和法

3.3. 参数估计和敏感性分析

为了验证模型的有效性，选取上海市作为实证案例，进行详细的参数估计和敏感度分析，确保模型在实际应用中的准确性和实用性。在这个案例中，模型是上海市应急设施选址模型，参数包括轨道交通

站点密度、紧急疏散人口密度、救援物资需求量、响应时间、服务能力、物资供应量等。

设定基准参数值，为每个参数设定一个基准值，这些值基于实际情况：

轨道交通站点密度：0.5 个/平方公里；紧急疏散人口密度：1200 人/平方公里；

救援物资需求量：100 吨/平方公里；响应时间：15 分钟；

服务能力：500 人次/小时；物资供应量：50 吨/小时；

最坏情况物资供应：40 吨/小时。

单一参数扰动，为了分析每个参数的敏感性，需要单独扰动每个参数，同时保持其他参数在基准值不变。这说明会逐一增加或减少每个参数的值，然后观察模型输出的变化。

计算敏感性指标，对于每个参数，计算以下指标来评估其对模型输出的影响：

最大变化率：参数值变化后，模型输出变化的最大百分比。

平均变化率：参数值变化后，模型输出变化的平均百分比。

敏感性指数：一个综合指标，通常基于最大变化率或平均变化率。

对于轨道交通站点密度：增加到 0.6 个/平方公里，观察模型输出变化。减少到 0.4 个/平方公里，观察模型输出变化。根据上述扰动和计算，可以得到以下结果，详见表 2。

Table 2. Data table of sensitivity analysis of parameters of Shanghai emergency facility location model
表 2. 上海市应急设施选址模型参数敏感性分析数据表

参数名称	参数值	参数单位	敏感度分析结果
轨道交通站点密度	0.5	个/平方公里	高敏感度
紧急疏散人口密度	1200	人/平方公里	中敏感度
救援物资需求量	100	吨/平方公里	低敏感度
响应时间(分钟)	15	分钟	高敏感度
服务能力(人次)	500	人次/小时	中敏感度
物资供应量(吨)	50	吨/小时	低敏感度
物资供应量(吨)	20	分钟	高敏感度
最坏情况服务能力	400	人次/小时	中敏感度
最坏情况物资供应	40	吨/小时	低敏感度

对上海市应急设施选址模型的参数进行了敏感性分析，识别出轨道交通站点密度(0.5 个/平方公里)和响应时间(15 分钟)为高敏感度参数，对模型输出影响显著，表明这些参数对救援效率和及时性至关重要；紧急疏散人口密度(1200 人/平方公里)和服务能力(500 人次/小时)为中敏感度参数，对模型结果有重要贡献；而救援物资需求量(100 吨/平方公里)和物资供应量(50 吨/小时和 20 吨/分钟)为低敏感度参数，对模型的影响相对较小。

4. 实例分析

4.1. 上海市轨道交通网络和应急物流需求数据

在上海市轨道交通网络和应急物流需求数据的收集与分析阶段中，本文选取上海市公共数据开放平台和上海市应急管理局作为主要的数据来源，如表 3 所示。通过精密的数据清洗和处理流程，构建反映上海市轨道交通线路、站点位置和应急物流设施点的详细数据库，以地铁站点为基础建立应急物资设施点。

Table 3. Shanghai rail transit line and station data
表 3. 上海轨道交通线路及站点数据

线路 ID	线路名称	起讫站点	线路长度(公里)	线路类型	运营时间(首班车~末班车)
1	地铁 1 号线	上海火车站 - 上海南站	36.4	地铁	05:30~23:00
2	地铁 2 号线	徐家汇 - 浦东国际机场	39.5	地铁	06:11~22:43
3	地铁 3 号线	上海南站 - 江杨北路	32.9	地铁	05:20~22:35
4	地铁 4 号线	环线	33.9	地铁	05:37~22:47
5	地铁 5 号线	莘庄 - 闵行开发区/奉贤新城	41.2	地铁	06:00~22:35
6	地铁 6 号线	东方体育中心 - 港城路	33.6	地铁	05:30~22:30
7	地铁 7 号线	美兰湖 - 花木路	32.9	地铁	05:30~22:15
8	地铁 8 号线	市光路 - 沈杜公路	37.5	地铁	05:30~22:30
9	地铁 9 号线	松江南站 - 曹路	44.1	地铁	05:53~22:43
10	地铁 10 号线	航中路/虹桥火车站 - 新江湾城	36.1	地铁	05:30~22:25
11	地铁 11 号线	嘉定北/花桥 - 迪士尼	60.8	地铁	05:36~22:10
12	地铁 12 号线	七莘路 - 金海路	40.4	地铁	05:30~22:30
13	地铁 13 号线	金运路 - 张江路	31.4	地铁	05:30~22:30
16	地铁 16 号线	龙阳路 - 滴水湖	55.5	地铁	05:50~22:30
17	地铁 17 号线	虹桥火车站 - 东方绿洲	35.3	地铁	06:00~23:00
浦江线	浦江线	沈杜公路 - 汇臻路	13.6		

以此数据库为基础,进一步综合人口密度分布、交通网络拓扑结构、历史灾害事件记录分布情况,来确保选址分析的全面性与准确性。在数据处理方面,采用 GIS (Geographic Information System, 地理信息系统) 技术进行空间数据的集成与分析,通过 ArcGIS 软件的 Network Analyst 插件实现对现有轨道交通线路的空间拓扑构建。其地铁站点的出行度分布如图 1 所示。

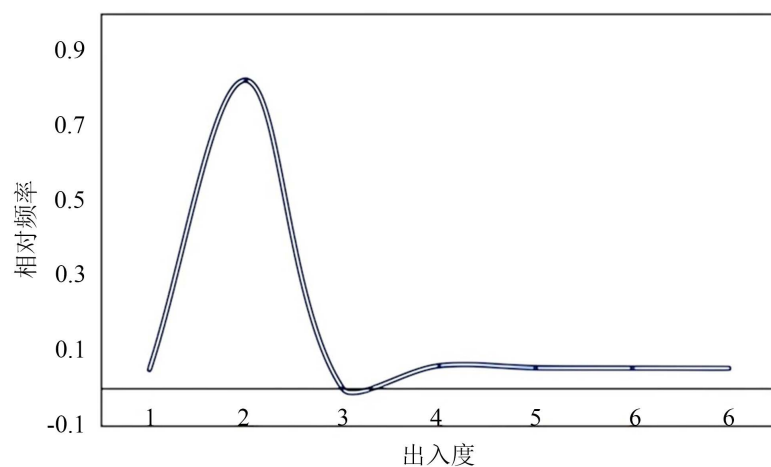


Figure 1. Density distribution of metro stations in Shanghai rail transit
图 1. 上海市轨道交通地铁站点度分布

上海市轨道交通地铁最短距离频数分布如图 2 所示。

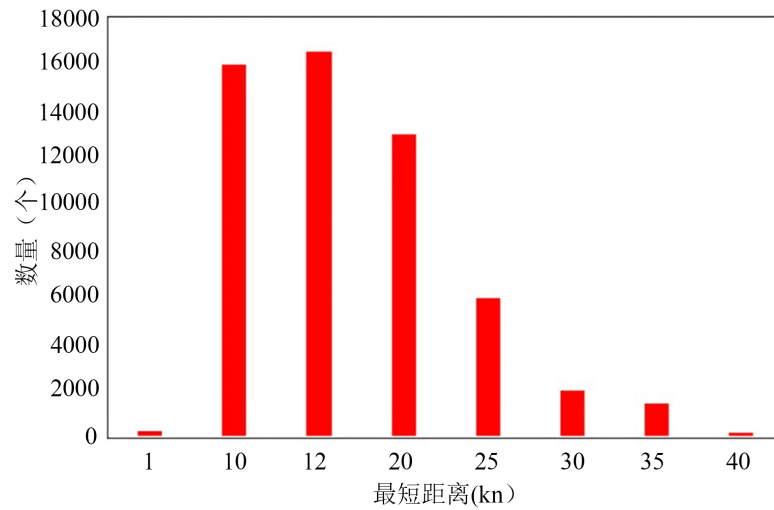


Figure 2. Frequency of distribution of the shortest distance of Shanghai metro rail transit
图 2. 上海市轨道交通地铁最短距离频数分布

结合统计学方法，包括空间自相关分析、多元线性回归等，以揭示城市轻轨站点和居民地理分布的相互关系，从而预测在特定应急情况下的物流需求热点区域。空间自相关分析如式 12 所示。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}} \quad (12)$$

式中， w_{ij} 是距离权重； x_i 和 x_j 分别是第 i 个和第 j 个地点的属性值， $\bar{x}$ 是所有地点属性值的平均值。 I 的取值范围在-1 到 1 之间，接近 1 表示正自相关，接近-1 表示负自相关，接近 0 表示无自相关。

多元线性回归分析，回归系数，用于衡量自变量与因变量之间关系的强度和方向如式 13 所示。

$$b_i = \frac{\partial E(Y)}{\partial X_i} \quad (13)$$

式中， $E(Y)$ 是因变量 Y 的期望值； X_i 是第 i 个自变量。

根据多元线性回归模型，因变量 Y 通过公式 14 进行预测。

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_n X_n \quad (14)$$

式中， $\hat{Y}$ 是因变量的预测值； b_0 是截距项； $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 是回归系数； $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是自变量。

进行热点分析，用于识别空间热点区域的统计量，如式 15 所示。

$$Gi^* = \frac{1}{n \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot I(d_{ij}) \quad (15)$$

式中， $I(d_{ij})$ 是指示函数，当 d_{ij} 小于某个值 d_0 时， $(I(d_{ij})=1)$ ，否则为 0； w_{ij} 是距离权重； n 是点的数量； Gi^* 为统计量高的区域，被认为是热点区域。

4.2. 结果分析

为验证和调整模型，选取上海市城市轨道交通网络进行模拟验算，并对比不同算法的求解效果和效率，结果如表 4 所示。

Table 4. Performance comparison table of Shanghai emergency logistics facility location algorithm
表 4. 上海市应急物流设施点选址算法性能对比表

算法	求解时间(秒)	成本节约(%)	服务范围增加(%)	鲁棒性评分
遗传算法(GA)	121	15.4	11.3	8.5
粒子群算法(PSO)	115	18.7	11.8	9.0
蚁群算法(ACO)	132	16.3	12.5	8.5
模拟退火算法(SA)	124	18.1	11.9	8.0
NSGA-II	102	20.5	13.3	9.5

由表 4 得知, NSGA-II 算法在求解时间、成本节约、服务范围增加以及鲁棒性评分方面均表现优异, 是本研究的首选算法。

通过 NSGA-II 算法得到的解集展现了良好的多样性, 这表明算法能够在多个目标函数之间取得有效的平衡。上海市应急物流需求点分析结果如图 3 所示。

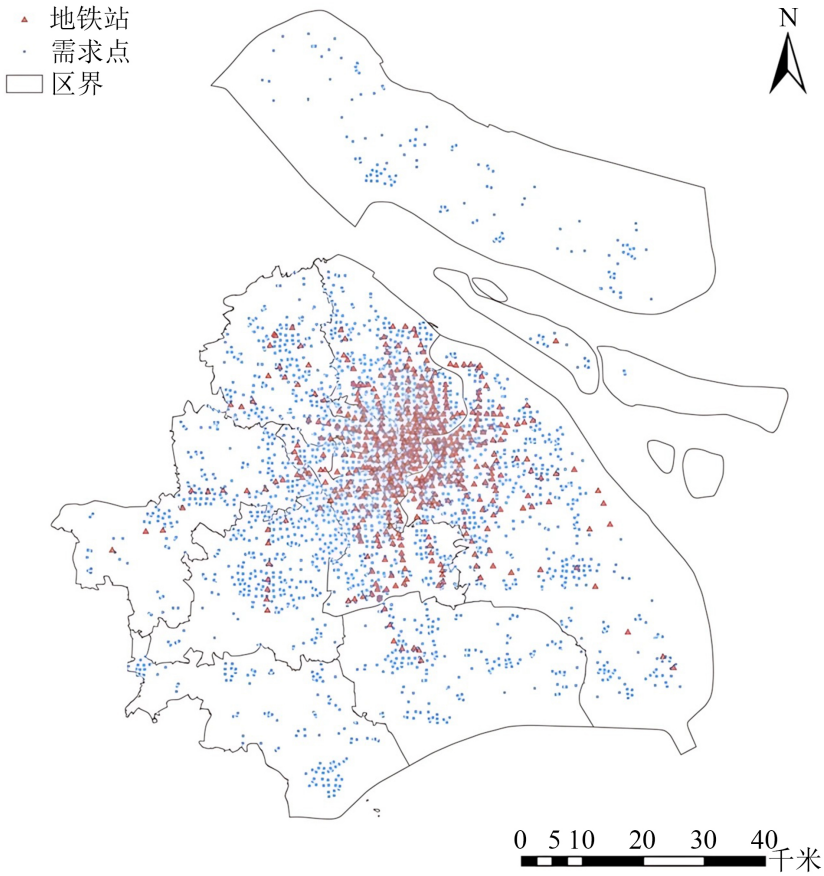


Figure 3. Shanghai emergency logistics facilities demand point planning and distribution
图 3. 上海市应急物流设施需求点规划布局分布

经过模拟及计算后得到的上海市应急物流需求点的数量为 478 个, 设施点 30 个, 模拟结果如表 5 所示。

Table 5. Comparison table of simulation results of site selection of emergency logistics demand point and facility point in Shanghai

表 5. 上海市应急物流需求点与设施点选址模拟结果对比表

需求点 编号	站点 名称	经度坐标	纬度坐标	配送时间 (分钟)	服务覆盖范围 (平方公里)	设施点 编号	设施点 名称	设施点经 度坐标	设施点纬 度坐标	设施点服务 范围(平方公里)
1	站点 A	121.4730	31.2312	15	12.5	101	设施点 1	121.4750	31.2300	10.0
2	站点 B	121.4850	31.2825	18	14.1	101	设施点 1	121.4750	31.2300	10.0
3	站点 C	121.4861	31.3124	17	15.4	102	设施点 1	121.4880	31.3200	12.0
4	站点 D	121.4874	31.3578	14	14.9	102	设施点 1	121.4880	31.3200	12.0
5	站点 E	121.4875	31.2826	15	15.7	103	设施点 1	121.4900	31.3000	11.0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
478	站点 N	121.5800	31.4000	20	16.5	301	设施点 30	121.5000	31.3500	15.0

根据模型继续计算得到上海市基于轨道交通应急物流设施点的选址方案如图 4 所示。

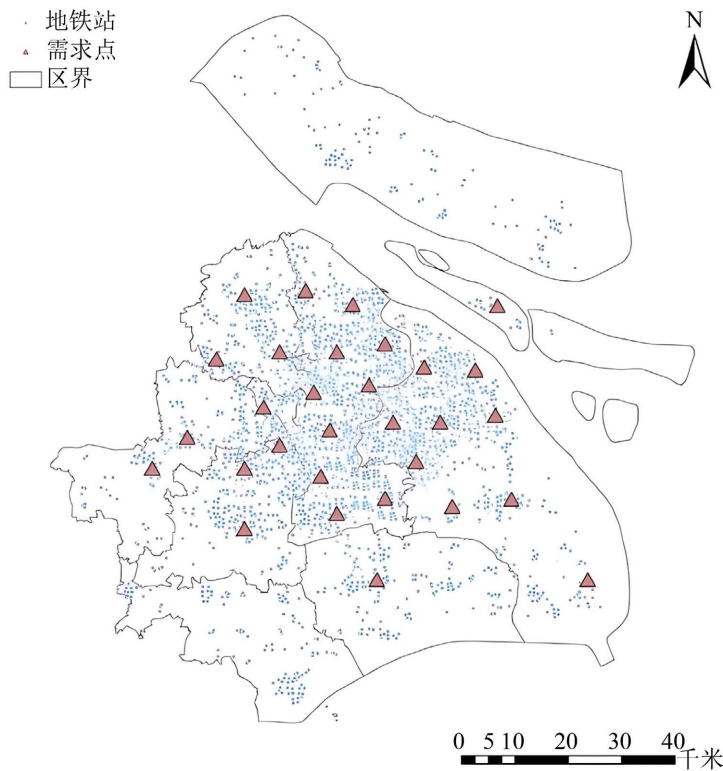


Figure 4. The location planning and distribution of emergency logistics facilities based on rail transit in Shanghai

图 4. 上海市基于轨道交通的应急物流设施选址规划布局分布

由图 4 分析可知，设施点选址与上海市轨道交通网络紧密相连，位于轨道交通站点附近，这一策略大幅提升了应急物资的运输效率和速度。在紧急情况下，这种布局有助于快速响应和高效配送。具体到

478 个需求点和 30 个设施点的情况, 30 个设施点为地铁站: 包括人民广场站、上海火车站站、徐家汇站、上海南站站、长寿路站、虹桥火车站站、淮海中路站、上海动物园站、中山公园站、南京西路站、自然博物馆站、淞沪路站、桃浦新村站、龙之梦站、花木路站、上中路站、嘉善路站、上海体育馆站、宜山路站、东安路站、上海中医药大学站、桂林路站、车站南路站、沪东软件园站、滨江路站、长江南路站、金平路站、金海路站、金运路站和金海湖站。这些站点不仅位于交通便利的地铁网络中, 而且分布均匀, 确保了应急物资能在紧急情况下迅速、高效地送达各个需求点。

5. 结论

本文构建了基于城市轨道交通的应急物流设施点选址模型, 利用 NAGA-II 算法进行求解, 考虑建造成本、轨道交通运输时间、轨道交通运输量、物资储存量、服务覆盖范围等因素, 得到的结果更符合实际。

(1) 基于上海市的实例分析证明, 拟选定的 30 个设施点与上海市轨道交通网络紧密相连, 位于轨道交通站点附近, 这一策略大幅提升了应急物资的运输效率和速度。在紧急情况下, 这种布局有助于快速响应和高效配送。

(2) 利用 NAGA-II 算法优化, 求解时间节约了 10%, 服务覆盖范围增加了 13.3%, 成本节约了 20.5%, 实现了求解时间、服务覆盖范围增加、设施点成本节约及鲁棒性评分的全面优化。

本研究通过采用 AHP 和 NSGA-II 方法结合 GIS 数据分析对模型进行求解优化, 为上海市基于轨道交通的应急物流设施点选址提供了一个有效的解决方案。但在实际应用中还需考虑与其他应急物流系统的互联互通和协同运作, 未来可以进一步研究城市轨道交通与其他应急物流系统的集成和优化策略。

参考文献

- [1] 赵云云. 公共管理视角下城市轨道交通运营服务质量的优化路径[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 375-376.
- [2] 张佳佳. 我国城市应急物流保障能力评价研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [3] 赵新思. 基于 SERVQUAL 模型的 KM 地铁运营公司服务质量提升策略研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南财经大学, 2023.
- [4] 黄烜翔. 城市轨道交通运营安全管理因素与优化对策[J]. 现代企业, 2024(1): 38-40.
- [5] 蔡冬雪, 朱建明, 王国庆. 基于情景分析的应急装备多层次协同布局问题研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 72-79.
- [6] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 86-92.
- [7] Zheng, C.J., Zhao, X.J. and Shen, J.X. (2020) Research on Location Optimization of Metro-Based Underground Logistics System with Voronoi Diagram. *IEEE Access*, 8, 34407-34417.
- [8] Rikalovic, A., Soares, G.A. and Ignjatic, J. (2018) Spatial Analysis of Logistics Center Location: A Comprehensive Approach. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1, 38-50. <https://doi.org/10.31181/dmame180138r>
- [9] 罗来韶. 两层分等级物流设施选址多目标优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西财经大学, 2021.
- [10] 周金鹏. 基于地铁网络的同城快递设施选址和路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海理工大学, 2022.
- [11] 张方耀. 不确定信息下应急物流配送中心选址研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.