

基于图神经网络的应急物流设施选址问题研究

郭强¹, 刘润泽¹, 刘建国²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海财经大学 数字经济学院, 上海 200433)

摘要: 应急物流设施选址是整个应急物流系统建设中的重要环节, 综合考虑应急物流候选地址组成的网络结构和地理信息, 提出了基于图神经网络的应急物流设施选址模型。通过对应急物流网络的节点进行特征编码, 该模型能够处理多种影响选址的现实因素以及复杂网络的结构信息。进一步, 使用特征最大和特征均衡两种损失函数, 控制模型选址的方向, 进而对候选地址进行排名。以上海市应急物流设施选址问题为例进行实证研究, 对上海市轨道交通网络进行建模。通过对输出结果进行合理性分析, 与经典的选址模型进行比较, 验证了提出模型能够利用候选地址的人文地理信息以及网络结构信息给出更好的选址结果。

关键词: 应急物流; 设施选址; 图神经网络; 复杂网络

中图分类号: TP 183

文献标志码: A

Location of emergency logistics facilities based on graph neural networks

GUO Qiang¹, LIU Runze¹, LIU Jianguo²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Digital Economics, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China)

Abstract: Emergency logistics facility location is a critical component in the overall construction of emergency logistics system. Based on the graph neural networks, an emergency logistics facility location model was proposed, which comprehensively considered the network structure and geographic information of candidate sites. After the nodes of the emergency logistics network were encoded with their features, the model could address various practical factors affecting site selection and the structural information of complex networks. Feature maximization and feature balance were adopted as loss functions to guide the model's site selection, and the candidate addresses were ranked accordingly. The

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72171150); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2023110139)

通信作者: 郭强(1975—), 女, 教授。研究方向: 网络科学、应急管理。E-mail: qiang.guo@usst.edu.cn

引文格式: 郭强, 刘润泽, 刘建国. 基于图神经网络的应急物流设施选址问题研究[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(3): 335-343.

Citation: GUO Qiang, LIU Runze, LIU Jianguo. Location of emergency logistics facilities based on graph neural networks[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(3): 335-343.

emergency logistics facility location problem in Shanghai was taken as a case study, and the city's rail transit network was modeled and analyzed. Through rationality analysis of output results and comparison with classic models, it is verified that the proposed model can fully utilize the human-geographic information and network structural information of candidate sites to obtain better location results.

Keywords: *emergency logistics; facility location; graph neural networks; complex network*

突发的重大紧急事件如自然灾害、病毒传染等，会对社会稳定和人民健康带来巨大的负面影响。在紧急事件发生后，为了对受到损害的地区和人民进行及时救援，防止伤害进一步加深，需要更加注重应急物流系统的建设与发展^[1-2]。而在整个应急物流系统的建设中，设施选址是十分重要的环节，应急设施如物资配送中心、物资储存中心、医疗中心、隔离中心等，能保证在有限的社会资源下，及时对受害地区和人民提供援助^[3]。如何在应急物流系统网络的众多候选地址中找到最适宜的地址，可以看作是一种网络中的节点排序问题，解决该问题需要考虑候选地址的现实条件与重要程度，并对其进行评估和排序^[4]。而应急设施选址区别于传统的排序方法，对各个节点的重要性在定义上进行了延伸，除了考虑网络结构特征等抽象层面的评估指标，更要注重该地址的实际人文、地理、交通等因素。

当前研究工作中，应急设施选址将现实层面的影响因素作为评选关键，根据构建应急设施的需求加入了特殊的选址评判标准。例如，徐勇强等^[5]提出了考虑交通满意度和时间满意度的应急物流网络选址模型，对河北省应急物流网络选址问题进行了实例验证和分析。耿劭卿^[6]考虑最小化灾民总转移距离、物资运输距离及开放避难场所数量，构建短期避难场所选址与物资分配多周期优化模型。靳国伟等^[7]提出了考虑设施地址的服务能力、需求覆盖以及车辆运输能力的随机性等，构建包含车辆运输能力机会约束的双层规划模型。王庆荣等^[8]构建了一个需求不确定下的两阶段应急选址-路径规划模型，并提出了一种改进的自适应遗传算法，可以为决策者提供较优的应急选址-路径规划方案。张锦等^[9]针对应急物流中心选址-路径规划问题，综合考虑需求不确定、拥堵时间不确定、最大救援时间要求、多车型情形等因素，采用三角模糊数刻画不确定参

数，构建基于多场景的两阶段模糊非线性选址-路径模型。朱莉等^[10]从复杂网络脆弱性视角出发，对备灾阶段应急储备库选址、分配网络中设施节点和运输连接边的脆弱性进行分析，构建多目标异质应急储备库选址分配模型，并以江苏省 13 个地级市应急物资储备分配网络为案例进行研究。

但是，这些传统算法大部分难以泛化到大规模场景，无法分析现实地理、交通网络中的大量数据，并且大部分多目标决策模型只能设置较少的目标，缺少对选址问题的全面考虑。而随着深度学习的发展，很多模型与方法，如图神经网络，能够处理大规模的网络数据，并将多种影响选址因素考虑在内。例如，Wang 等^[11]构建了一种结合变分图自编码器 (variational graph auto-encoders, VGAE) 和随机森林 (random forest, RF) 的应急避难所选址模型，该模型基于网络地理信息，捕捉地理单元耦合的潜在特征，将显示特征与潜在特征相结合，预测建筑区域应急避难的可能性。王中等^[12]提出一种耦合设施选址图注意力网络和深度强化学习算法的通用图强化选址模型，解决了公共服务设施智能化选址问题。Yi 等^[13]提出了一个深度时空注意模型 DeepSTA，采用递归神经网络对事件信息建模，使用 Node2vec 对道路区域之间的相关性进行建模，并在新型冠状病毒感染疫情期间的实际物流数据上进行实验，验证该模型的有效性。

图神经网络模型能够将更多的选址影响因素考虑在内，为选址问题提供更加丰富的参考条件，因此，本文提出基于图卷积神经网络 (graph convolutional neural network, GCN)^[14] 的应急物流设施选址模型。对交通网络进行建模，将所有候选地址的人口、地理、交通、网络结构等信息编码进节点特征中，丰富节点在整个模型中的表达能力，通过设置特征最大和特征均衡两种损失函数控制选址方向，对所有节点在选址问题上的表

现进行排序,最终确定应急设施的地址。以上海市应急物流设施选址问题为实例,根据其轨道网络建模对应的复杂网络,将各交通站点抽象为应急设施的候选地址,与基线模型在平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和均方误差(mean squared error, MSE)两种评价指标的表现上进行对比,并对模型输出结果进行合理性分析,验证本文提出模型的有效性。

1 网络建模与节点特征编码

1.1 复杂网络建模

上海市轨道交通网络拥有极高的覆盖面积,站点分布十分广泛且均衡,能够代表上海市以及各个辖区的地理信息。因此,借助上海市轨道交通网络的站点分布及其连通性来构建复杂网络。截至2024年12月,本研究收集了411个正在运行的交通站点作为网络的节点,同时也作为应急物流设施的候选地址。根据所有站点的连接情况,统计出475条连边。

图 $G = (V, E)$ 表示整个轨道交通网络,其中,节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示所有候选地址的集合,共包含 n 个节点。每个节点 $v \in V$ 对应一个 m 维特征向量 $X_v \in \mathbb{R}^m$,将所有节点的特征向量按行堆叠,构成节点的特征矩 $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$,即 $X = [X_{v_1}^T; X_{v_2}^T; \dots; X_{v_n}^T]$,其中, m 为节点的特征维数。

$E \subseteq V \times V$ 表示网络的边集合。根据实际的轨道交通情况,所有边为无向边,即若节点 v_i 与 v_j 之间存在连边,则 v_j 与 v_i 之间也存在连边。采用 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示该网络的邻接矩阵,矩阵中的元素 a_{ij} 定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 之间存在连边 } (i \neq j) \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

特别地,对于无向图,邻接矩阵 A 为对称矩阵,满足 $a_{ij} = a_{ji}$,且对角线元素 $a_{ii} = 0$ (即不考虑节点到自身的自环)。在后续 GCN 计算中,将对 A 添加单位矩阵 I 的方式引入自环,此时使用 $\tilde{A} = A + I$ 作为带自环的邻接矩阵。

1.2 节点特征编码

仅凭网络的结构信息无法准确判断应急设施的选址,现实情况下还需要考虑众多实际选址因素,如地理、人文、交通等情况。综合已有研究对设施选址问题提出的参考条件,结合应急物流

设施选址的实际需求,本文收集了与选址相关的11种影响因素,为所有节点进行特征编码。特征编码包括3个方面:人口与地理因素共6个特征;交通便利性因素共2个特征;网络结构因素共3个特征。

a. 人口与地理特征编码

文献[11]提出了人口密度高的地点在紧急事件发生后对应急设施的需求更高,并且能够提供更多的援助力量,而过高的建筑物会影响设施地址的安全性。文献[15]论证了医疗设施选址时,卫生机构数量是一个重要参考条件。在已有工作的基础上,确定了应急设施地址的人口、地理选址目标为人口密度高、年龄构成适中。15~59岁人口占比高,且文化程度较高的地点,在紧急事件发生后,能够提供更多的援助力量参与,并且年龄与文化程度保证了这些援助力量的质量。同时,高层建筑物较少、卫生机构多、公共预算支出多的地点能够保证设施地址的安全性,提供更好的医疗资源,并且能够对设施建设提供经济支持。根据《上海市统计年鉴2023》^[16],收集各辖区的相关信息,包括人口密度、常住人口年龄构成、常住人口文化程度、高层(8层以上)房屋面积、卫生机构数量、公共预算支出。按照交通站点所属辖区,为其分配对应的信息编码。将各区基于选址目标,按照年鉴中提供的数据进行排名。由于年鉴中给出的数据是统计各区的总值,为了公平起见,将数据按照该区的站点数量进行标准化后进行排序。由于金山区和崇明区没有候选地址,不计入排名,排序结果如表1所示。

根据期望的选址目标,将所有区按照统计年鉴的数据进行排名,并对排名进行标准化,标准化后的得分控制在0~1之间。按照节点所属区,将对应的得分编码到节点特征中,标准化的公式为

$$S = \frac{r - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (1)$$

式中: S 表示该区最终的排名得分; r 表示当前排名; $r_{\max}$ 表示最高排名; $r_{\min}$ 表示最低排名。

b. 交通便利性特征编码

文献[5,17]以交通满意度和交通可达性为目标构建模型,论证了设施地址交通便利性的重要性。在紧急事件发生后,轨道交通网络可能会受到毁坏,所以考虑到实际应急物流运输的多样性,本文收集了所有站点附近的高速和轮渡口的邻近情况。该站点附近5 km内是否存在高速与轮渡口的情况也作为节点特征被编码,在对应的特

表 1 各区在选址影响因素下的排名

Tab.1 Ranking of each district under influencing factors of location

区域	人口密度	年龄构成	文化程度	高层房屋	卫生机构	公共预算
浦东新区	10	1	8	2	9	1
黄浦区	3	14	10	9	3	4
徐汇区	5	10	1	3	6	10
长宁区	7	13	2	7	1	14
静安区	2	11	6	12	2	8
普陀区	4	8	5	4	11	12
虹口区	1	12	4	8	5	13
杨浦区	6	9	3	1	10	11
闵行区	9	2	7	6	7	2
宝山区	8	3	9	5	8	9
嘉定区	11	5	12	11	4	3
松江区	12	4	11	14	14	6
青浦区	13	6	13	10	13	5
奉贤区	14	7	14	13	12	7

征位置上，临近高速或轮渡口为 1，不存在为 0。

c. 网络结构特征编码

文献 [4] 则说明了中心性在节点排序研究中的关键作用，能够根据网络结构信息为节点的重要程度提供参考条件。将网络中每一个节点的度中心性、介数中心性、接近中心性也作为特征进行编码。在复杂网络中，中心性能够刻画该节点在网络中的重要程度，本文计算所有节点的 3 种中心性指标并归一化为节点特征。

度中心性能够直接体现一个节点的重要程度，节点的度越大证明该节点在网络中越重要，计算公式为

$$D_i = \frac{k_i}{N-1} \tag{2}$$

式中： D_i 为节点*i*的度中心性指标值； k_i 为节点*i*的度，定义为与节点直接相连的边的数目； N 为网络中节点的总数。

介数中心性是以经过某个节点的最短路径数量来刻画节点重要性的指标，计算公式为

$$B_i = \frac{2}{(N-1)(N-2)} \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \tag{3}$$

式中： B_i 为节点*i*的介数中心性指标值； g_{st} 为节点*s*到节点*t*的最短路径数量； n_{st}^i 为节点*s*到节点*t*的*g_{st}*条最短路径中经过节点*i*的最短路径数量。

接近中心性用于度量一个节点到其他节点的平均距离，计算公式为

$$d_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ij} \tag{4}$$

$$C_i = \frac{1}{d_i} \tag{5}$$

式中： d_{ij} 为节点*i*到节点*j*的距离； d_i 为节点*i*到其他节点的平均距离，其值越小则表示节点*i*越接近其他节点； C_i 为节点*i*的接近中心性。

综合上述所有对选址产生影响的因素，包括人口地理特征、交通便利性特征、网络结构特征，对每一个节点创建 11 个特征编码，将更多的选址影响因素考虑在内，丰富每个节点的表达能力，为选址模型的学习提供前置准备。

2 基于图卷积的应急物流设施选址模型

2.1 图卷积神经网络

完成整个交通网络建模以及节点特征编码后，将邻接矩阵*A*和节点特征矩阵*X*输入到图卷积模型中，进行节点的表示学习。为了得到选址结果，将选址问题转化为网络中的节点排序问题，最终的输出是最适合选址的节点排名。首先，邻接矩阵*A*和节点特征矩阵*X*会进入一个两层图卷积层，GCN 能够在每一层学习到节点新的特征表示，这些表示通过聚合周边邻居节点信息而来。

对于第*K*个图卷积层，使用*H^(k-1)*表示输入的所有节点的特征矩阵，*H^(k)*表示输出矩阵，所以第一个图卷积层的输入矩阵为节点的初始特征矩阵：

$$H^{(0)} = X \tag{6}$$

在每一层的图卷积中，节点的隐藏表示会与其邻居节点进行聚合。GCN 层的信息传播和聚合过程可以定义为矩阵形式：

$$H^k = \sigma \left(\tilde{D}^{-\frac{1}{2}} \tilde{A} \tilde{D}^{-\frac{1}{2}} H^{(k-1)} w^{(k)} \right) \tag{7}$$

式中： $\tilde{A} = A + I_N$ 是添加了自连接的邻接矩阵； I_N 为单位矩阵； $\tilde{D}$ 是 $\tilde{A}$ 的度矩阵； $w^{(k)}$ 是当前图卷积层的可训练权重矩阵； $\sigma(\cdot)$ 为激活函数。

通过堆叠多个图卷积层，节点特征会按照层的顺序传播，并进行特征维度的升降，增强其表达能力。同时，多层图卷积有聚合多跳邻居信息的能力，在第*K*个图卷积层，目标节点会获得*K*跳

邻居的节点信息。

2.2 特征最大与特征均衡损失

经过图卷积层的学习后, 节点获得了新的特征表示, 区别于传统的分类任务, 本文中的每个节点没有事先设置对应标签, 这与现实情况相吻合, 节点能否成为符合条件的候选地址是未知的, 需要模型对所有节点进行排名。所以在损失函数的设置上不同于一般分类任务中的真实值与预测值计算损失, 而是设计了两种基于节点特征

的损失函数, 用来控制模型的学习方向和节点的最终排名。

首先是特征最大损失, 该损失函数通过对当前节点的特征值进行求和, 并将其作为目标进行最大化, 从而鼓励模型能够尽可能学习到节点的最突出特征。对于节点本身而言, 更大的特征值即对应选址中更有利的条件, 如交通更加便利、人口更加密集、医疗机构更多等优势, 从而确定该节点适合作为应急设施的地址。

具体来说, 对于网络中的节点集合 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 和每个节点的特征向量 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$, x_{ij} 表示节点 v_i 在第 j 个特征上的数值, 特征最大损失函数 $L_{\max}$ 被定义为每个节点所有特征值之和的负值, 其计算公式为

$$L_{\max} = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m x_{ij}$$

(8)

为了确保最终输出的候选节点特征值尽量均衡, 还设计了一种特征均衡损失。因为在实际选址问题中, 每一处的应急设施都不应该具有明显短板。即使该地址其他条件十分优秀, 存在一处缺陷也会对应急物流系统的运行和灾害救灾的活动产生影响。所以在每个特征维度上都保持平衡

是必要的。

使用方差来度量每个节点特征的分布平衡, 方差越小, 代表着特征表现越均衡。对于每个节点计算其特征的均值 $\bar{x}_i$, 然后计算方差 V_i 。均值、方差的计算公式为

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}$$

(9)

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

(10)

特征均衡损失函数 L_{mean} 定义为节点所有特征方差的负和, 模型被鼓励学习特征均衡的节点。均衡损失函数的公式为

$$L_{\text{mean}} = - \sum_{i=1}^N V_i$$

(11)

通过特征最大和特征均衡两种损失函数的设置, 分别根据损失计算梯度、梯度更新模型参数, 模型获得两种不同的学习方式, 以此控制模型的输出方向。为了能够贴合实际, 选址问题的输出结果不仅需要考虑追求某一特征的最大有利性, 也要确保所有特征没有明显缺陷, 所以选择两次输出候选地址排名的交集作为最终的选址结果, 模型的整体架构如图 1 所示。

模型总体工作流程为: 输入是由轨道交通网络建模而成的复杂网络的邻接矩阵 $\mathbf{A}$, 邻接矩阵记录着各个节点之间的连通关系, 为模型学习提供网络结构信息; 另一个输入是包含 11 种选址影响因素的节点特征矩阵 $\mathbf{X}$, 记录着每个候选地址的特征, 包含量化后的应急物流设施选址的现实选择条件。两个矩阵经过一个两层的 GCN 获得每个节点的新的特征表示, 新的特征表示会融合节点的

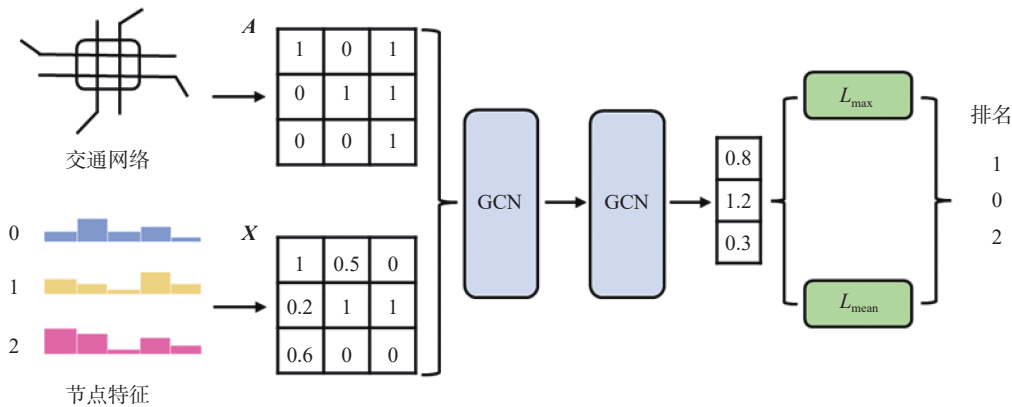


图 1 模型架构图

Fig.1 Architecture diagram of model

邻居节点信息来更新自身表示，输出为更新后的特征矩阵；控制输出网络层的大小来代表节点的选址得分，随后对矩阵分别应用特征最大损失函数和特征均衡损失函数，更新模型参数并学习选址模式，经过训练循环后根据所有节点的得分情况输出选址排名。

3 实证分析

3.1 实验设置

实验使用数据为上海市轨道交通网络建模的复杂网络数据，包含 411 个节点和 475 条边，每个节点为其编码维度为 11 的节点特征，特征包括该节点的高速、轮渡口的邻近情况，节点所在区的人口密度、年龄构成、文化程度、高层房屋面积、医疗机构数量、公共预算支出，以及节点的度中心性、介数中心性、接近中心性。基于图卷积的选址模型参数设置如表 2 所示，包括深度学习模型训练的一些常用参数设置，合理的参数设置能提高模型性能表现，节约计算成本。

表 2 模型参数设置
Tab.2 Model parameter settings

参数名称	含义	数值
图卷积层数量	图卷积层个数决定节点获得几跳邻居信息	2
节点特征维数	通过编码获得的节点特征数量	11
输入层大小	图卷积网络层的输入维度	11
隐藏层大小	将输入的节点特征表示映射到更高维度并增加表达能力	32
输出层大小	将节点特征表示下降到低维对应排名得分	1
学习率	优化器更新权重时使用的步长大小	0.01
训练轮次	数据集完整地通过模型的过程	100

3.2 基线模型

为了验证本文模型在选址问题中的有效性，选取两个传统算法的基线模型来进行对比，同样使用由轨道交通网络建模的网络数据。

a. 基于 K-means 算法的选址模型

K-means 是一种常用且直观的聚类算法，能够处理大规模数据，具有计算效率高、可解释性强、扩展灵活等特点，在当前选址问题研究中应用广泛。该算法将数据集划分为 K 个簇，目标是通过最小化数据点到其所属簇中心的距离，从而实现数据的分组。本文首先设定了 K-means 聚类的簇数量为 3 个，对于数据集中的每个数据点，

计算其与每个簇中心的距离，然后将每个数据点分配给最近的簇中心。重新计算每个簇的中心，即更新步骤，计算每个簇中心的新位置，并重复迭代。对所有候选地址的节点特征进行聚类分析，并且设计一个得分计算函数，用于评估每个候选地址在所有特征上的表现。得分是通过将每个特征的排名相加得出，确保高得分节点的输出，并且在各个特征上均表现良好，避免出现明显短板的情况。最后，基于计算得出的综合得分，输出表现最佳的候选地址。

b. 基于中心性算法的选址模型

节点的度中心性、介数中心性、接近中心性指标借助网络结构的特性，来判断节点在网络中的绝对位置、重要性，以及与其他节点的欧式距离等，在计算过程中可以忽略节点本身特征带来的影响。基于中心性的选址模型只使用网络结构信息，通过计算所有候选地址的 3 种中心性排序，并依据得分情况输出排序结果，以此来验证本文提出模型对所有候选地址的人文地理、交通等信息进行特征编码的有效性，能够输出更加符合现实选址要求的地址结果。

3.3 评价指标

为了能够将本文模型与基线模型的性能表现进行对比，选取 MAE 和 MSE 进行评估。对所有模型在 11 个影响因素下的 15 个输出结果计算 MAE 和 MSE，每一个影响因素下的特征表现由前 15 名候选地址的误差平均值作为代表。MAE 和 MSE 能够表示模型的输出值与目标值之间的接近程度，从而直观地进行模型之间的性能比较。

a. MAE 的计算公式为

$$P_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \widehat{y}_i| \tag{12}$$

式中： P_{MAE} 表示平均绝对误差的计算值； y_i 表示第 i 个样本的期望目标值； $\widehat{y}_i$ 表示第 i 个样本的模型输出值。

b. MSE 的计算公式为

$$P_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 \tag{13}$$

式中， P_{MSE} 表示均方误差的计算值。

3.4 实验结果与分析

a. 选址结果

由于模型输出为所有候选地址的排名，本文

只展示前 15 名的候选节点作为上海市应急物流设施选址的结果，采用模型为本文提出的基于 GCN 的选址模型、基于 *K*-means 算法的选址模型，以及基于中心性 Centrality 算法的选址模型，实验结果如表 3 所示。

b. 评价指标表现

对于每种影响因素，需要设置期望目标值，以便于计算模型输出结果与目标值之间的误差，误差值越小，证明模型输出结果在每种影响因素上的表现越接近期望目标，更加符合应急物流设施的选址要求。在期望目标值设置方面，由于 11 种影响因素没有具体的期望数值，需要用模型输出的候选地址的特征相对表现来确定。对于模型输出结果，将 15 个候选地址的特征表现在对应的影响因素维度上进行相加并平均，然后进行标准化，将每种特征值表现控制在 0~1 之间。特征表现越接近 1 则证明该结果越符合选址条件，用数值 1 来表示该因素下的最优目标，分别对应该候选地址的人口密度最大、中青年人口比例最多、文化程度最高、高层房屋面积最小、卫生机构最多、公共预算最多、与高速和轮渡口临近、度中心性、介数中心性、接近中心性最高。所有模型在 MAE 与 MSE 的表现如表 4 所示，结果保留两位小数，最优结果用粗体标注。

c. 结果分析

根据表 4 的实验结果，在模型输出的前 15 名候选地址中，*K*-means 算法模型有 5 个结果与本文模型的结果相同，Centrality 算法模型仅有 2 个结

表 3 选址模型实验结果
Tab.3 Experiment results of location model

地址排名	模型		
	GCN	<i>K</i> -means	Centrality
1	成山路	昌邑路	南京西路
2	凌兆新村	世纪大道	世纪大道
3	杨思	御桥	陆家嘴
4	三林	南京西路	南京东路
5	灵岩南路	东方体育中心	浦东南路
6	龙耀路	陕西南路	龙阳路
7	浦东大道	南京东路	浦东大道
8	桂林公园	龙耀路	静安寺
9	浦东1号2号航站楼	浦东南路	中山公园
10	豫园	三林	上海科技馆
11	商城路	长清路	曹杨路
12	南京西路	浦东大道	世纪公园
13	罗秀路	景洪路	上海火车站
14	华夏中路	华夏中路	镇坪路
15	大世界	三林东	上海西站

果与本文模型相同。根据表 4 的实验结果，本文模型的输出结果在人口、地理、交通等 8 个影响因素下的表现均为最优，与目标值的误差最小，并且平均 MAE 与 MSE 分别比 *K*-means 模型降低了 0.13 与 0.11，分别比中心性模型降低了 0.15 与 0.13，证明了本文提出的模型在人口、地理、交通的预期目标下能够进行更加合理的选址操作。

表 4 选址模型的评价指标表现

Tab.4 Evaluation index performance of location model

模型	评价指标	人口密度	年龄构成	文化程度	高层房屋	卫生机构	公共预算	高速临近	轮渡临近	度中心	介数中心	接近中心
GCN	MAE	0.42	0.31	0.45	0.29	0.47	0.23	0.36	0.32	0.79	0.81	0.45
	MSE	0.18	0.10	0.20	0.08	0.22	0.05	0.13	0.10	0.60	0.66	0.20
<i>K</i> -means	MAE	0.62	0.45	0.58	0.34	0.69	0.21	0.56	0.61	0.82	0.86	0.66
	MSE	0.38	0.20	0.34	0.16	0.48	0.04	0.31	0.37	0.67	0.74	0.44
Centrality	MAE	0.72	0.73	0.76	0.74	0.62	0.71	0.87	0.81	0.21	0.21	0.17
	MSE	0.52	0.53	0.58	0.55	0.38	0.50	0.77	0.65	0.04	0.04	0.03

基于 *K*-means 算法的选址模型在评价指标上的表现与本文模型最为接近，特别是在高层房屋面积与公共预算两种影响因素下的表现。原因在于，聚类的过程让模型倾向于输出不同类别下数量较多的节点，而浦东新区具有最多的候选地

址，并且该区在这两种影响因素中具有较高的排名，所以模型在对应的特征表现上会取得较好的结果。在网络结构中心性影响因素下的特征表现中，基于中心性算法的模型取得了最优表现结果，这与模型设计相吻合。基于中心性的选址模

型考虑的是抽象层面的网络结构特征，模型被鼓励输出中心性指标较高的候选地址，这些地址在网络结构方面确实具有关键作用，具有较高的连通性和与其他节点之间的较短欧式距离。但是，这并不能说明中心性表现良好的候选地址就能够达到应急设施的要求，还需要根据候选地址的实际信息来进行评判。

所以对于模型输出的实验结果，需要对其现实人口、地理、交通等条件进行合理性分析，并判断候选地址是否满足选址相关需求。根据表3结果，在GCN模型输出的前15名候选地址中，排名第1、2、3、4、5、7、9、11、14位的位于浦东新区。该区常住人口最多，辖区占地面积最大，平均每个候选地址的人口密度、年龄构成和文化程度处于所有区的中上游水平。高层房屋面积较少，卫生机构数量较多，公共预算支出最大，能为应急设施的建造提供良好的基础。其中：排名第1、2、3、4、5位的临近上海市外环高速和三港线轮渡口；排名第9、14位的临近迎宾高速；排名第7、11位的临近塘董线和南陆线轮渡口，能为紧急事件下物流服务提供丰富的交通方式选择。排名第6、8、13位的位于徐汇区，该区常住人口数量多，年龄构成和文化程度在各区均排于前列，由于位于市中心区域，高层房屋面积较多，医疗机构数量多，公共预算支出处于中间水平。其中：排名第6、13位的临近外环高速；排名第8位的临近三港线轮渡口。排名第10、15位的位于黄浦区，排名第12位的位于静安区，两区的常住人口数量较多，年龄构成排名和文化程度排名处在中间水平，高层建筑面积较少，医疗机构数量与公共预算支出在上游水平。排名第10、15、12位的临近塘董线和南陆线轮渡口，有着灵活的交通方式选择。

在基于K-means算法的实验结果中，除与本文提出模型相同的结果外，排名第1、2、3、5、9、11、15位的候选地址位于浦东新区，在辖区的人口、地理、经济等相关影响因素中，有着总体上较好的表现，人口密度、年龄构成、文化程度和卫生机构数量处于所有区的中间水平，高层房屋面积较少，公共预算支出较多，能够为应急设施建设提供良好的支持，并且在对应的特征指标表现上有着相对较高的数值结果。排名第6、13位的位于徐汇区，人口相关因素均处于中上游

水平，卫生机构数量多，公共预算支出较多，但是高层房屋面积偏多可能会对设施地址的安全性带来影响。同时在该模型输出的排序结果中，大部分候选地址仅存在一种交通备选方式，即要么临近高速要么临近轮渡口，与本文模型结果相比，缺少了紧急情况下交通选择的多样性，并且所有候选地址在地理上过于集中，很难达到实际应急选址的覆盖面积需求。排名第3、7、9位的均不临近高速与轮渡口，无法为应急物流提供有效的交通条件，不适宜作为应急设施的地址选择。

基于Centrality算法的模型仅考虑了应急设施的结构特性，忽略了应急设施地址所在地的现实影响因素。选址结果过于集中于网络的中心，紧靠市中心的区域存在较多的高层建筑，设施地址的安全性难以得到保证，并且市中心建筑繁多，无法对应急设施的构建作出空间预留。排名第2、3、5、6、7、10、12位的候选地址位于浦东新区，有着良好的设施建设基础。排名第8、13位的位于静安区，排名第11、14、15位的位于普陀区，两区人口密度较高，且年龄构成与文化程度处于中间水平，卫生机构数量与公共预算支出处于中间水平。但是在交通便利性方面，基于中心性的选址模型与本文模型仅具有两个相同的选址，剩余13个地址均不临近高速。13个地址中仅有排名第2、6、10、12位的临近轮渡口，其余地址既不临近高速也不临近轮渡，缺少了紧急事件下交通运输方式的多样性与灵活性，并不适合作为应急物流设施地址的选择。

综合多种人口、地理、交通等因素，本文模型输出的应急设施候选地址符合紧急事件下物流服务的需求，各个地址有着较高的常住人口密度，年龄构成上以青年和中年居多，常住人口也有着较高的文化程度，能为紧急事件提供充足的人员储备。高层房屋面积除徐汇区外均处于中间和下游水平，降低了应急设施地点的安全隐患，医疗机构较多，保障了选址地点的医疗水平，公共预算支出较高，为设施的构建提供保障。所有候选地址除了有固定的轨道交通模式，也都临近高速与轮渡口，在面临交通网络损坏时有着更多的交通选择。各个候选地址以市区为中心分散分布，既不会过于紧靠市中心位置，也与市内各事件发生地有着均衡的实际里程，模型输出的前15名候选地址的实际地理位置如图2所示。



图 2 前 15 名候选地址实际地理位置

Fig.2 Geographic locations of the top 15 candidate sites

4 结 论

本文针对现实交通网络的复杂性以及显示选址问题的参考条件，提出了一种基于 GCN 网络的多因素编码应急物流设施选址模型。研究将交通站点的高速便利性、轮渡口可达性等交通特征，以及人口密度、年龄构成、文化程度、高层房屋分布、卫生机构数量、公共预算支出等人文地理特征，轨道交通复杂网络的度中心性、介数中心性、接近中心性等多种因素编码为节点特征，以增强节点在模型中的表达能力。在此基础上，通过设置特征最大损失和特征均衡损失两种损失函数对模型选址方向进行控制，并生成候选地址的优先级排名，从而确定应急设施的最佳选址位置。以上海市应急物流设施选址为例，研究基于上海市轨道交通站点分布构建复杂网络模型，将站点作为网络节点，站点间的连通性作为网络边。上海市轨道交通网络包含 411 个节点和 475 条边，每个节点为其编码维度为 11 的节点特征。结果表明，15 个站点的地理位置适合作为上海市的应急物流设施候选地，并通过与基线模型对比，验证本文提出方法的优越性。

当前研究有以下工作可以进一步完善。首先，应急物流选址是非常复杂的问题，除本文提出的选址影响因素外，还需要考虑更多的实际情况，并且模型假设轨道交通在突发事件发生的条件下仍然可以正常运行。因此，如何考虑轨道交通的运营风险，进一步丰富模型的应用场景，这些都是未来研究可深入的方向。同时，如何完善研究结果的可解释性也是论文下一步的研究重点。

参考文献：

[1] 戢晓峰, 杨春丽, 郝京京, 等. 国内外应急物流研究热点

对比与展望 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(12): 144–152.

[2] 许蕾. 重大突发事件下国内外应急物流研究综述 [J]. 中国储运, 2024(3): 103–104.

[3] 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.

[4] 曹璐, 丁苍峰, 马乐荣, 等. 面向图神经网络的节点重要性排序研究进展 [J]. 计算机科学与探索, 2025, 19(4): 877–900.

[5] 徐勇强, 王堃, 任立媛. 重大卫生事件下河北省应急物流服务网络选址研究 [J]. 价值工程, 2025, 44(5): 67–69.

[6] 耿劭卿. 震后恢复阶段短期避难场所选址与物资分配优化 [J]. 物流技术, 2025, 44(2): 73–84.

[7] 靳国伟, 任维权, 王文杰, 等. 车辆运输能力随机的应急物流选址-分配-路径优化 [J]. 铁路物流, 2025, 43(1): 25–33.

[8] 王庆荣, 王雪娜, 朱昌锋, 等. 需求不确定下的两阶段应急物流选址-路径研究 [J]. 灾害学, 2025, 40(1): 160–166.

[9] 张锦, 朱红星, 申皓, 等. 复杂环境下工程建设项目应急物流选址-路径问题研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 280–289.

[10] 朱莉, 杨耀星, 储德水, 等. 脆弱性视角下异质应急储备库选址-分配研究 [J]. 系统科学与数学, 2025, 45(4): 1044–1063.

[11] WANG Y, HAN Y Y, LUO A, et al. Site selection and prediction of urban emergency shelter based on VGAE-RF model[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 14368.

[12] 王中, 曹凯. 耦合改进图注意力网络与深度强化学习的公共服务设施智能化选址方法 [J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(11): 2452–2464.

[13] YI J H, YAN H, WANG H T, et al. DeepSTA: a spatial-temporal attention network for logistics delivery timely rate prediction in anomaly conditions[C]//Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management. Birmingham: ACM, 2023: 4916–4922.

[14] KIPF T N, WELING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations. Toulon: ICLR, 2017.

[15] 孙华丽, 常芊芊, 赵一. 基于模糊规划的应急医疗设施选址-多周期伤员后送优化 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2025, 31(1): 182–196.

[16] 上海市统计局, 国家统计局上海调查总队. 上海统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.

[17] 赖志柱, 王铮, 戈冬梅, 等. 多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型 [J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 74–83.