

中文引用格式:张子扬,杨赛霓. 动态网络算法在城市路网应急场景中的应用综述[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10):149-156.
英文引用格式:ZHANG Ziyang, YANG Saini. Review of application of dynamic network algorithms in urban road network emergency scenarios[J]. China Safety Science Journal,2025,35(10):149-156.

动态网络算法在城市路网应急场景中的应用综述^{*}

张子扬^{1,2}, 杨赛霓^{**1}教授

(1 北京师范大学 国家安全与应急管理学院, 北京 100875; 2 北京师范大学 系统科学学院, 北京 100875)

中图分类号:X913.4 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1633

【摘要】 为解决城市应急场景日益复杂化、多元化对动态网络算法应用带来的异构数据融合和算法协同应用新挑战,系统梳理动态网络算法的情景应用特征,探索多算法协同与集成的实现路径。首先,基于Scopus数据库近5年128篇文献,采用关键词词频统计与聚类分析方法,识别出路径规划、流量调控、风险防范及韧性分析4大研究主题;然后,通过文献内容分析归纳规划、模拟、聚类与深度学习4类核心算法,结合实证、仿真及混合数据源,解析其理论架构与任务适配逻辑;最后,建立多维度评估体系,综合对比算法在不同应急场景中的适用性、优势及短板。结果表明:通过规划、模拟、聚类和深度学习4类算法的多元集成,可实现城市应急管理中路径规划、流量调控、风险防范与韧性分析的多维响应,提升应急体系的适应性与稳健性;数据驱动下的智能算法将进一步提高城市路网响应效率,促进实时策略调整与资源优化;未来发展方向应聚焦于多网融合的耦合分析及算法集成的智能协同架构建设,助力动态网络算法在多场景应急管理中的高效应用。

【关键词】 城市路网; 应急管理; 动态网络算法; 路径规划; 流量调控; 风险防范; 韧性分析

Review of application of dynamic network algorithms in urban road network emergency scenarios

ZHANG Ziyang^{1,2}, YANG Saini¹

(1 School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 School of Systems Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In response to new challenges, the application characteristics of dynamic network algorithms were reviewed. These challenges were posed by complex and diversified urban emergency scenarios. Heterogeneous data fusion and algorithmic collaboration were involved. Additionally, approaches for multi-algorithm collaboration and integration were explored. Firstly, based on 128 publications from the past five years in the Scopus database, four major research themes: path planning, traffic regulation, risk prevention, and resilience analysis, which were identified using keyword frequency statistics and cluster analysis. Then, through content analysis, four core algorithm categories: planning, simulation, clustering, and deep learning were summarized. Their theoretical frameworks and task adaptation logic were examined in conjunction with empirical data, simulations, and hybrid data sources. Finally, a

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0149-08; 收稿日期:2025-05-11; 修稿日期:2025-08-08

** 通信作者:杨赛霓(1975—),女,江苏常州人,博士,教授,主要从事基础设施风险评估与应急管理方面的研究。E-mail:yangsaini@bnu.edu.cn。

multidimensional evaluation system was constructed to comparatively assess the applicability, strengths, and limitations of different algorithms across various emergency scenarios. The results show that multiple algorithms are integrated in application, which include planning, simulation, clustering, and deep learning. This integrated approach enables a multidimensional response to urban emergency management tasks. Such tasks involve path planning, traffic regulation, risk prevention, and resilience analysis. The adaptability of emergency systems are enhanced. The robustness of these systems is also improved. Data-driven intelligent algorithms further improve the responsiveness of urban road networks, supporting real-time strategy adjustment and resource optimization. Future development should focus on the construction of intelligent collaborative architectures for algorithm integration and coupled analysis across multiple networks, to advance the efficient application of dynamic network algorithms in multi-scenario emergency management.

Keywords: urban road network; emergency management; dynamic network algorithms; path planning; traffic flow control; risk prevention; resilience analysis

0 引言

在自然灾害、事故灾难、社会安全事件与公共卫生事件的处置中,城市道路网络对应急处突的快速响应具有关键基础作用^[1],并呈现出基础设施网、运输服务网、信息共享网与能源供给网融合发展的趋势^[2-3]。随着城市规模的扩大化和城市管理的复杂化,路网应急管理对实时监控、快速响应和精准决策的要求日益凸显。面对多网融合跨域数据异构性和应急多任务场景差异性增加的挑战,亟需构建精准适配多应急情景的多算法协同整合框架,以增强复杂场景下应急管理的数据融合与算法支持能力。

目前,动态网络算法已广泛应用于城市应急管理。动态网络算法通过整合路网和交通流多维数据,量化表达城市路网的动态演化特征,实现城市路网系统状态的分析与评估。随着技术的演进,这些算法已经呈现出“数据驱动—模型迭代—决策优化”的技术发展路径^[4-5]。但是,国内关于应急场景下城市路网动态网络算法研究文献较少,国外针对城市路网应急管理领域的研究主要集中于单一类型灾害情境的基础网络算法应用和响应决策分析^[6-7];或选取某种特定算法从理论定义和技术实现角度叙述其应用方式^[8]。现有研究和综述缺乏对动态网络算法在多任务目标和多应急流程中的应用效果评估,以及适用性考量^[9]。

鉴于此,笔者拟通过关键词聚类,挖掘文献的研究热点,并结合文献内容开展语义分析,剖析动态网络算法在复杂应急场景中的技术实现路径与应用模式差异,评估算法的实践表现,总结算法功能适配性、协同机制与约束条件,并探索动态网络算法在未

来城市应急响应决策中的效能提升与创新应用方式。

1 动态网络算法在复杂应急场景中的应用综述研究设计

1.1 研究方法与数据来源

选择文献更新频率较高、学科领域覆盖较广的英文文献数据库 Scopus 为对象,根据以下步骤开展检索并建立文献数据库:①关键词检索。设定(emergency management + network algorithm)和(dynamic network+network algorithm)为检索字段,时间跨度为2018—2023年,通过主题检索路径获得文献共806篇。②文献筛选与甄别。将文献主题收窄至urban road network,并核对全文内容剔除无关文献,筛选出符合研究要求的文献128篇。③建立文献数据库。将所选文献按应急主题,算法类型和研究目标进行分类整理,构建结构化文献数据库。

1.2 研究热点描述分析

基于CiteSpace对128篇文献进行计量分析,提取出9个高频关键词并生成聚类图谱(图1)。采用类属分析法^[10],识别出当前城市路网应急管理中,以城市运输网络为模型基础的4个热点研究主题。

1) 韧性分析。韧性分析是保障路网安全的基础性研究。当前文献在韧性分析方面有2个研究热点,即路网韧性与智能交通系统。

2) 路径规划。路径选择与优化是应急管理的核心任务。考虑效率和可达性的应急车辆路径规划及针对不同应急场景与网络结构的路径优化,是当前业界广泛关注的研究主题。

3) 流量调控。承载流量的分析预测对交通动态调整至关重要。交通流控制、车载自组网、自适应交通控制系统和智能交通系统紧密关联,是当前研究前沿。

4) 风险防范。风险预测评估对应急管理起到预警作用,尤其是应急医疗资源分配需要严格规避高风险区域,是当前研究关注的重点。

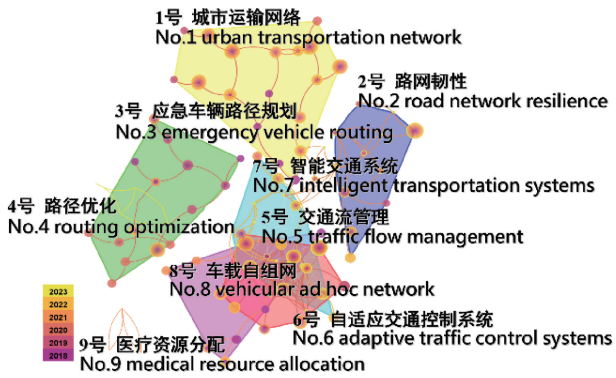


图 1 高频关键词聚类图谱

Fig. 1 Clustering map of high-frequency keywords in abstract

1.3 算法应用系统框架

基于韧性分析、路径规划、风险防范和流量调控 4 个应急主题任务的系统拆分与归纳,梳理并构建算法在不同主题任务驱动下的目标-理论-应用框架,如图 2 所示。

现有研究大多通过传统法和对偶法构建道路交通模型,传统法分别将道路和节点映射为网络节点与连边,着重支撑路径规划与流量调控;对偶法以道路作为节点,道路交叉作为连边,着重适配风险防范与韧性评估。经统计,37 篇文献采用人车流实证数据,85 篇文献基于仿真软件生成数据,6 篇文献基于混合数据源。文中基于规划、仿真、聚类及深度学习算法,实现城市路网交通动态行为识别与路径优化,以驱动应急响应效率与交通安全水平的协同提升。

2 关键路径精准解析-规划算法

2.1 规划算法的建模基础与求解策略

规划算法基于运筹学理论构建时变约束方程组,通过参数化目标函数,融合网络状态迁移机制设定约束方程组,迭代求出全局最优解。公式化的规划算法既可解析路网动态特性,又能通过调整收敛策略适配多类型应急场景。其中,典型的 DTA 能够集成路径流量分配方程、网络守恒方程及用户均衡方程,结合 Dijkstra/A* 等最短路径算法^[11],通过节



注:动态交通分配模型(Dynamic Traffic Assignment, DTA); 卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN); 图神经网络(Graph Neural Network, GNN), 强化学习(Reinforcement Learning, RL)。

图 2 动态网络算法应用框架

Fig. 2 Framework diagram of application of dynamic network algorithms

点容量、连边流速等时序数据计算最优运输路径,完成快速救援、疏散、物资运输路线的规划任务。在新冠疫情背景下,学者们将传染病模型(Susceptible-Infectious-Recovered Model, SIR)与 DTA 模型耦合,基于区域感染风险动态优化路径权重,实现分区分级疫区医疗物资精准调度^[12-13],完成公共卫生事件中兼顾低传播风险和高效率救援的运输路径优化任务。

在复杂的应急情境中,规划算法可以通过帕累托最优框架动态平衡任务中多目标的优先级,生成兼顾安全与高效的可行解集供决策者比选^[14],尤其

适配需要考虑人流量最大化和距离/疏散时间最小化的密集区域快速疏散任务^[15]。此外,规划算法的迭代过程也可借鉴自然界生物行为和进化机制改进迭代参数,建立仿生智能算法。如遗传算法以路段为“个体”,通过选择、交叉和变异操作优化物资配送^[16];蚁群算法基于信息素浓度快速决策出最短路径^[17];动态蝙蝠算法基于各路径中“回声”的交叉关联定位最优路径,抑或利用“回声”的大小和频率预测流量,完成流量调控和风险防范任务^[18]。

2.2 规划算法的发展态势

当前 74 篇采用规划算法的文献中,主流方法为 DTA 模型(共计 48 篇),通过解构时空序列数据建立约束方程,高效求解最优路径^[19]。研究进展呈现 3 大方向:①跨学科融合(3 篇)。跨领域耦合模型(SIR 传染病模型)实现应急网络协同优化。②多目标平衡(6 篇)。引入帕累托前沿解集生成技术,兼顾疏散效率与安全。③仿生智能增强迭代(17 篇)。通过遗传算法、蚁群算法和动态蝙蝠算法提升多场景自适应能力。当前,规划算法存在多目标权重和仿生智能算法迭代参数依赖专家经验设定的技术瓶颈,但该算法在城市路网应急管理中展现出极高的适用性,尤其在应急救援和疏散等场景表现突出,通过多学科融合驱动,其优化效能会持续增强,为构建智能决策系统提供关键技术支持。

3 城市道路应急场景动态推演-模拟算法

3.1 模拟算法的推演机制与方法体系

当前 28 篇模拟算法研究覆盖全类型应急任务,该算法基于随机过程理论构建路网模型,通过随机交通流集成事故、灾害等不确定因素,复现真实或假设应急场景中的路网动态演化,从而精准得出流量波动、故障传播路径等关键信息和数据,解析城市交通系统运行状态。

针对不同类型的应急需求,学界采取 2 种模拟思路开展研究。一种为基于历史统计数据的模拟方式。该方式根据长期交通流量与事故记录,构建时空演化模型量化计算节点/连边失效概率。其技术路径为首先整合人车流、灾害数据,然后计算流量转移方向概率、交通负荷率等参数,构建动态贝叶斯网络或 Markov 过程模型,最后通过随机模拟结果预测各道路交通流压力、节点可达性及故障区域。该方法在突发事件概率评估中优势显著,既能生成事故

规避和热点区域流量疏散方案^[20],也可计算出基础设施损毁概率,生成韧性评估报告并分析恢复策略^[21],兼具计算效率与实操性。另一种为基于路网拓扑结构的模拟方式。依据路网拓扑结构与物理互馈机制,结合路网拓扑参数构建力学模型,模拟灾害连锁反应^[22]。算法通过模拟多情境变量因果关系解析出复杂路网系统的非线性交互,突破历史数据对动态突变场景的建模局限,能够更加精准识别脆弱组件、预测损毁阈值^[23],进而综合评估系统韧性,并制定符合实际灾情的灾后恢复策略。

3.2 模拟算法的应用对比与评估

2 种模拟方法均可整合多源数据,还原路网流量波动趋势,从而识别局部或整体故障区域,评估路网功能损失^[24-25]。基于历史数据的模拟方法依赖数据源质量,仅有 9 篇研究采用该模拟方法,其中 4 篇采用实证数据,其余 5 篇通过先验阈值与专家参数调整弥补数据缺失。该方法需要充足的历史数据或完善先验研究支撑才能保证概率精度。相较而言,系统动力学方法聚焦路网节点与连边的多向动态反馈机制,通过物理模型整合,系统性模拟路网应急体系中各组件间的交互响应与环境适应过程。该方法降低了对高精度实证数据的要求,通过增加模拟次数和参数优化,显著提升决策精度与鲁棒性,适用于复杂多变的应急场景。因此,研究更倾向采用系统动力学方法开展仿真分析。

4 风险热点快速定位-聚类算法

4.1 聚类算法的划分策略与场景适配

当前研究共有 12 篇文献采用聚类算法,研究聚焦于风险防范任务。其中 3 篇选用 k -means 聚类算法,9 篇采用模糊聚类算法。聚类算法基于统计理论,通过度量节点/边数据相似性,揭示交通系统在应急场景下的组件聚集与关联演变规律。研究采用 k -means 聚类和模糊聚类 2 种方法; k -means 聚类通过最小化数据点与 k 个质心距离总和,构建高内聚、高区分的稳定集群^[26];模糊聚类则通过隶属度函数实现柔性分类,允许数据点同时归属多个集群,以隶属度最大化原则优化辨识度,适用于边界模糊的连续分类场景^[27]。

k -means 算法通过自定义多维距离参数,如节点受灾程度/人车流量/物资需求等,加权评估目标节点应急优先级。该算法可基于节点受灾程度与灾前、灾中和灾后人员密度的动态变化,精准测算物资

补给需求,指导储备点选址^[28]。模糊聚类则通过隶属度量化数据归属概率,适用于更广泛的应用场景^[29],其柔性分类特性可捕捉路网突变状态,该算法可通过分析节点流量、流速等数据,识别交通高峰异常变化特征,进而发现潜在拥堵点和事故点,实现车流高峰路段预警及资源调度任务^[30]。

4.2 聚类算法的性能比较

聚类算法通过路网数据动态特征分析识别网络结构差异与演变特征,进而捕捉网络行为特征^[31]。面对不同应急情境下的任务需求,聚类算法可评估结构强度阈值、检测异常组件分布,优化交通预测与资源配置。其中 *k*-means 算法计算高效但对噪声敏感,易受异常值干扰;模糊聚类通过隶属度软分配,兼容多源异构数据且抗噪性强,但复杂隶属度设置可能降低分类效率。前者适用于需明确分类的场景,如数量分级;后者更适配不确定性任务,如高峰期拥堵识别,二者通过不同数学框架支撑多维应急决策。

5 智能决策自主寻优-深度学习算法

5.1 算法的神经网络架构与感知决策机制

深度学习算法通过多层神经网络模拟人脑认知机制,逐层提取路网数据特征并优化参数设置,实现对应急网络动态行为的高维解析。其黑箱学习的特性使其可依赖经验数据实现自主优化^[32],在缺乏显式数学公式时仍能有效处理路径规划与流量调控任务。深度学习算法既能预测路网整体状态演变,也可以识别节点/连边的潜在关联与异常。当前文献共采用了 CNN 卷积神经网络、GNN 图神经网络和 RL 强化学习 3 种架构以应对路径规划与流量调控任务,提升算法对城市路网特征的提取能力和实时响应决策精度。其中,CNN 卷积神经网络将路网节点属性与连接关系转化为时序网格矩阵,适用于结构化路网的最优路径选择与流量预测^[33];GNN 图神经网络基于地理邻接关系整合流量、路况等多源时序数据,通过节点信息传递机制实现关键路径识别与交通流精准预测^[34];RL 强化学习引入环境交互反馈机制,通过奖惩规则训练模型适应复杂应急场景,在动态路径优化与实时车辆调度中展现显著优势^[35]。相较于 CNN 和 GNN 2 种算法,RL 算法凭借卓越的环境自适应纠错能力大幅提高识别和预测精度^[36],得到业界的广泛应用。

5.2 智能算法的演进分析

深度学习算法依托硬件升级与大数据处理能

力,加速应用于城市路网应急管理。在 14 篇相关研究中,半数采用 RL 算法,其通过环境交互反馈实现动态优化,显著降低标注数据依赖,提升决策精度与场景适应性。相较于传统规划,模拟和聚类算法,RL 能有效规避处理非线性数据时的效率瓶颈,在人工智能技术深度融合背景下,通过多智能体协作框架与自适应奖惩机制,增强实时分析与动态决策能力。特别是在多变量驱动的应急场景中,RL 既突破传统算法复杂度激增的局限,又通过持续学习机制推进路网管理系统向智能化、自动化发展演进^[37]。

6 不足与展望

6.1 算法应用瓶颈

1) 动态网络算法应用展望。通过对算法应用的汇总分析发现,应急管理需整合规划算法、模拟仿真、聚类分析与深度学习构建多算法框架,以适配任务需求的异质性。例如:聚类算法可前置筛选数据并分级风险,为规划和系统动力模拟算法提供清晰迭代方向^[38];深度学习可自主学习生物数据特征,优化仿生智能算法参数配置;模拟算法生成的数据流可训练深度学习模型,提升决策精度。4 类算法通过功能互补形成协同机制,既突破单一算法在数据规模、实时性、非线性关系处理中的局限,又通过交叉验证增强结果稳健性,最终实现应急响应效率与系统适应性的双重提升。

2) 数智驱动动态推演能力有待强化。对文献算法的评估总结发现,当前多源异构数据与动态管理需求推动算法向环境自适应方向演进^[39]。其中,仿生智能、系统动力学模拟及深度学习算法可实时感知环境变化,动态调整参数适配不同交通场景,极大优化资源配置与应急决策。上述 3 种算法在复杂动态环境下展现出的卓越环境自适应性和精准决策支持能力可极大拓展算法的应用领域,提高应急响应效率。同时,智能化和自动化技术的发展推动了数据获取、数据预处理和并行计算技术的进步^[40],推动路网管理系统从被动响应向智能预控的范式升级。

6.2 算法应用展望

1) 多网融合推动耦合分析与算法跨域发展。基础设施、运输、信息、能源多网融合趋势下,未来城市应急管理研究更加聚焦跨领域算法协同与多层级网络耦合分析。如文献案例融合 SIR 传染病模型与规划算法,动态优化医疗物资调度,实现学科交叉突破并支撑防疫政策制定。多网融合通过数据互通与

系统交互,驱动算法在耦合网络中的精准适配,既促进跨领域模型移植能力,又通过多源数据映射强化算法泛化能力,为动态网络分析提供跨维度的理论与应用拓展。

2) 多算法协同架构驱动算法智能集成化发展。随着未来城市路网应急事件日益复杂,数据呈现出更加多源异构的特征,因此,亟需构建多算法智能协同推理架构。学者们可基于模拟算法生成路网时空风险概率分布矩阵,或基于聚类算法对数据节点进行噪声过滤和特征萃取,优化仿生智能算法的迭代收敛速度,并驱动深度学习算法贴合具体场景快速提升识别和预测精度,该架构融合4种算法优势,通过整合可灵活调用且程序兼容的算法模块,兼顾实际应用中的精度与效率,实现应急任务的高效分解

和处理,提供全链路的应急处置方案。

7 结 论

1) 基础设施、运输服务、信息共享与能源供给网络的深度融合,为城市应急管理提供了稳定的多源异构数据支撑,提升了信息覆盖率与应急响应时效。

2) 跨领域算法集成增强了模型的自适应能力与多情境适配性,推动动态网络算法向多任务协同演进。

3) 依托规划、模拟、聚类与深度学习算法的功能互补,以及分布式计算的日益成熟,可为高效、灵活的算法体系构建提供支撑,助力复杂城市应急场景下的策略优化与快速响应。

参 考 文 献

- [1] KAPUCU N. Disaster and emergency management systems in urban areas[J]. Cities, 2012, 29: 41-49.
- [2] ROHR A, PRIESMEIER P, TZAVELLA K, et al. System criticality of road network areas for emergency management services: spatial assessment using a tessellation approach [J]. Infrastructures, 2020, 5 (11): DOI: 10.3390/infrastructures5110099.
- [3] DING Lin, ZHANG Hanchao, LI Deren. Monitoring and analysis of urban sprawl based on road network data and high-resolution remote sensing imagery: a case study of China's provincial capitals[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2022, 88(7): 479-486.
- [4] 詹伟,程春鑫. 基于 GWO-BP 的震后过渡安置阶段应急物资需求预测[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 17-23.
ZHAN Wei, CHENG Chunxin. GWO-BP-based forecasting of emergency material demand in post-earthquake transitional resettlement phase[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 17-23.
- [5] PARIZI S M, TALEAI M, SHARIFI A. A spatial evaluation framework of urban physical resilience considering different phases of disaster risk management[J]. Natural Hazards, 2024, 120(14): 1-36.
- [6] 耿劭卿,侯汉平,周洲. 基于文献计量分析的应急避难所救援系统综述[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 195-203.
GENG Shaoqing, HOU Hanping, ZHOU Zhou. A review of emergency shelter rescue system based on bibliometric analysis[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 195-203.
- [7] 戡晓峰,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.
JI Xiaofeng, YANG Chunli, HAO Jingjing, et al. Research prospects and hotspot comparison for emergency logistics in China and foreign countries[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(12): 144-152.
- [8] DING Rui, NORSIDAH U, HUSSAIN B H, et al. Application of complex networks theory in urban traffic network researches[J]. Networks and Spatial Economics, 2019, 19: 1 281-1 317.
- [9] HUMAGAIN S, SINHA R, LAI E, et al. A systematic review of route optimisation and pre-emption methods for emergency vehicles[J]. Transport Reviews, 2020, 40(1): 35-53.
- [10] HU Qian, YEO J, KAPUCU N. A systematic review of empirical emergency management network research: formation and development, properties, and performance [J]. The American Review of Public Administration, 2022, 52(4): 280-297.
- [11] ABUSALAMA J, RAZALI S, CHOO Y H, et al. Dynamic real-time capacity constrained routing algorithm for evacuation

- planning problem[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2020, 20(3): 1 388–1 396.
- [12] TANG Junqing, LIN Huali, FAN Xudong, et al. A topology-based evaluation of resilience on urban road networks against epidemic spread: implications for COVID-19 responses[J]. Frontiers in Public Health, 2022, 10: DOI:10.3389/fpubh.2022.1023176.
- [13] ZHENG Jijie, BAO Fuguang, SHEN Zhonghua, et al. RETRACTED ARTICLE: Data-driven dynamic adjustment and optimization model of emergency logistics network in public health[J]. Risk Management and Healthcare Policy, 2022, 12(15): 151–169.
- [14] PETCHROMPO S, COIT D W, BRINTRUP A, et al. A review of pareto pruning methods for multi-objective optimization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 167: DOI:10.1016/j.cie.2022.108022.
- [15] NATH H N, DEMPE S, DHAMALA T N. A bicriteria approach for saving a path maximizing dynamic contraflow[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2022, 39(3): DOI:10.1142/S0217595921500275.
- [16] CHEN Min. Retracted Article: optimal path planning and data simulation of emergency material distribution based on improved neural network algorithm[J]. Soft Computing, 2023, 27(9): 5 995–6 005.
- [17] MAVROVOUNIOTIS M, ANASTASIADOU M N, HADJIMITSIS D. Measuring the performance of ant colony optimization algorithms for the dynamic traveling salesman problem[J]. Algorithms, 2023, 16(12): DOI:10.3390/a16120545.
- [18] JOSE C, VIJULAGRACE K S. Optimization based routing model for the dynamic path planning of emergency vehicles[J]. Evolutionary Intelligence, 2022, 15(2): 1 425–1 439.
- [19] AMARAL R R, SEMANJSKI I, GAUTAMA S, et al. Exploring the issue of integrating logistics and traffic control in urban areas[J]. Transportation Planning and Technology, 2019, 42(6): 606–624.
- [20] DE FRANCESCO C, PALAZZI C E, RONZANI D. Fast message broadcasting in vehicular networks: model analysis and performance evaluation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(8): 1 669–1 672.
- [21] KAYA Y, VENTURA C. Seismic structural health monitoring of bridges in British Columbia, Canada[J]. Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications, 2019, 15(1): 31–49.
- [22] RENZI E, ZAMPINO S, PALERMO G, et al. An integrated risk management system for road infrastructures: focus on seismic risk and network performance[J]. Procedia Structural Integrity, 2023, 44: 355–362.
- [23] DE SORTIS A, VESTRONI F, MARCHESINI S, et al. Analysis of the recorded response of a school building heavily damaged by the 2016 central Italy earthquake[J]. Buildings, 2022, 12(7): DOI:10.3390/buildings12070907.
- [24] XIA Dengyou, QIAN Xinming, DUAN Zaipeng. Scenario deduction model of unconventional emergency based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2015, 36(6): 897–902.
- [25] 南锐, 肖叶静, 王静. 突发事件应急管理情景分析: 宏观审视与微观解构[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 265–276.
- NAN Rui, XIAO Yejing, WANG Jing. Scenario analysis of emergency management: macroscopic review and microscopic deconstruction[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(2): 265–276.
- [26] AZZAOU N, KORICHI A, BRIK B, et al. Towards optimal dissemination of emergency messages in internet of vehicles: a dynamic clustering-based approach[J]. Electronics, 2021, 10(8): DOI:10.3390/electronics10080979.
- [27] YIN Qi. Design and application of smart city internet of things service platform based on fuzzy clustering algorithm[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022(1): DOI:10.1155/2022/8405306.
- [28] LIU Chaofeng, YIN He, SUN Yixin, et al. A grade identification method of critical node in urban road network based on multi-attribute evaluation correction[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): DOI:10.3390/app12020813.
- [29] 张敏, 于剑. 基于划分的模糊聚类算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 858–868.
- ZHANG Min, YU Jian. Fuzzy partitional clustering algorithms[J]. Journal of Software, 2004, 15(6): 858–869.
- [30] IKIDID A, EL FAZZIKI A, SADGAL M. A multi-agent framework for dynamic traffic management considering priority link[J]. International Journal of Communication Networks and Information Security, 2021, 13(2): 324–330.
- [31] KHAN A, AFTAB F, ZHANG Zhongshan. UAPM: an urgency-aware packet management for disaster management using flying ad-hoc networks[J]. China Communications, 2019, 16(11): 167–182.
- [32] HASSIJA V, CHAMOLA V, MAHAPATRA A, et al. Interpreting black-box models: a review on explainable artificial intelligence[J]. Cognitive Computation, 2024, 16(1): 45–74.
- [33] KEARNEY S P, COOPS N C, SETHI S, et al. Maintaining accurate, current, rural road network data: an extraction and updating routine using RapidEye, participatory GIS and deep learning[J]. International Journal of Applied Earth

- Observation and Geoinformation, 2020, 87: DOI:10.1016/j.jag.2019.102031.
- [34] SUN Bin, GENG Renkang, SHEN Tao, et al. Dynamic emergency transit forecasting with IoT sequential data[J]. Mobile Networks and Applications, 2023, 28(6): 2 015–2 029.
- [35] RAJAN K, KUMAR K S, KANNAPIRAN T, et al. Intelligent traffic management system for smart cities utilizing reinforcement learning algorithm[C]. 2022 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETISIS). IEEE, 2022: 170–177.
- [36] ROLF B, JACKSON I, MÜLLER M, et al. A review on reinforcement learning algorithms and applications in supply chain management[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(20): 7 151–7 179.
- [37] 朱仕威,叶宝林,吴维敏. 基于深度学习的短时交通流预测方法综述与仿真研究[J]. 软件导刊, 2024, 23(2): 182–193.
- ZHU Shiwei, YE Baolin, WU Weimin. Review and simulation of short-term traffic flow prediction methods based on deep learning[J]. Software Guide, 2024, 23(2): 182–193.
- [38] CHEN Saifei, FU Hui, QIAO Yan, et al. Route choice behavior modeling for emergency evacuation and efficiency analysis based on type-II fuzzy theory[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(7): 6 934–6 949.
- [39] 程方明,王琛琛,袁晓芳. 安全发展视角下城市应急管理能力评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 158–167.
- CHENG Fangming, WANG Chenchen, YUAN Xiaofang. Evaluation of urban emergency management capabilities from perspective of safe development[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 158–167.
- [40] CHEN Yingxin, LIU Xin, TADIKAMALLA P R, et al. Evolutionary game analysis for multi-level collaborative governance under public crisis in China: from a value perception perspective[J]. Risk Analysis, 2024, 44(3): 582–611.



作者简介： 张子扬（1995—），男，河南商丘人，博士研究生，主要研究方向关键基础设施与应急管理、气候变化风险。E-mail: 202231250021@mail.bnu.edu.cn。