

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.02

考虑应急需求的地下物流系统服务能力评估研究

侯龙龙^{1,2}, 许元鲜³, 董建军⁴, 鲁世博⁴, 陈志龙⁵

(1. 北京工业大学 建筑与城市规划学院, 北京 100124; 2. 河南工业大学 管理学院, 郑州 450001;
3. 南京审计大学 工程审计学院, 南京 211815; 4. 南京理工大学 理学院, 南京 210094;
5. 陆军工程大学 国防工程学院, 南京 210007)

摘要: 地下物流系统(Underground Logistics System, ULS) 作为一类具有公共设施属性的地下化城市基础设施, 可以依托高适灾韧性的货运网络, 高效满足城市应急需求。然而, 在复杂应急物流情景下, ULS 的网络化运行机制及其货运效能评估方法仍然尚未明晰。研究从 ULS 应急服务能力的内涵出发, 分析了运行环境、网络结构和运行调度对其应急服务能力的影响, 并构建了涵盖效率、效力及公平性维度的应急服务能力度量模型。依托南京市仙林案例, 研究设计了基于货运需求和地面道路损坏的组合模拟仿真场景, 对比分析了地面卡车配送和 ULS 的应急服务质量。结果表明: ULS 的应急服务能力优势明显, 在地面交通不畅及较窄的应急需求时间窗下尤为显著; 增加节点物流作业冗余、末端配送模式优化以及满足局部货运公平性是提升 ULS 应急服务能力的关键。研究成果不仅丰富了 ULS 规划理论, 也从地下空间开发利用视角为城市应急治理提供了新的思路。

关键词: 地下物流系统; 应急物流; 地下物流应急网络; 服务能力评估

中图分类号: U121; F252 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2026)02-0388-13

Evaluation Study on Service Capacity in Underground Logistics System Considering Emergency Demands

Hou Longlong^{1,2}, Xu Yuanxian³, Dong Jianjun⁴, Lu Shibo⁴, Chen Zhilong⁵

(1. College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China;
2. School of Management, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China; 3. School of Engineering Audit, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, P. R. China; 4. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R. China; 5. College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, P. R. China)

Abstract: Underground Logistics System (ULS), as a subterranean urban infrastructure with public utility attributes, can effectively meet urban emergency demands through highly resilient freight networks. However, the operational mechanisms and performance assessment methods for ULS in complex emergency logistics scenarios remain underdeveloped. This study examines ULS emergency service capacity, focusing on the impacts of the operational environment, network structure, and scheduling. A model measuring efficiency, effectiveness, and fairness is developed. Simulations based on freight demand and surface road damage, using the Xianlin case in Nanjing, compare ULS and surface truck delivery. Results show that: ULS exhibits significant advantages in emergency freight

收稿日期: 2025-06-13 (修改稿)

作者简介: 侯龙龙 (1995—), 男, 河南驻马店人, 博士生, 主要从事地下物流系统、地下空间等领域的研究。

E-mail: allen_hll@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 许元鲜 (1991—), 男, 江苏扬州人, 博士, 讲师, 主要从事地下物流系统、地下工程等领域的研究工作。

E-mail: 270303@nau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (72271125); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (25KJB560015, 24KJB560017); 江苏省城市地下空间开发利用与安全防护工程研究中心开放基金 (2023-CSDXJJ-04)

performance, particularly under conditions of surface traffic congestion and narrow emergency response time windows. Furthermore, increasing node logistics redundancy, optimizing end-point delivery modes, and ensuring local freight fairness are identified as key factors in enhancing ULS emergency service capacity. This research advances ULS planning theory and offers new insights for urban emergency management.

Keywords: underground logistics system; humanitarian logistics; underground logistics network for emergencies; service capacity evaluation

0 引言

依托网络化的城市物流基础设施是提升城市应急能力的重要抓手。近年颁布的《“十四五”国家应急体系规划的通知》中明确提出构建高效、安全的城市综合应急运输网络的战略需求^[1]。然而,当前城市应急物流组织无序化和运行低效等问题仍然突出,传统依托城市道路网的应急物流网络在突发事件中效能有限^[2]。以2022年上海疫情期间为例,城市应急物资中转环节延迟超过3 d,应急物资积压和腐烂现象频发^[3]。统计结果也表明物资短缺导致的应急损失占灾害总损失的15%~20%^[4]。因此,亟需通过技术和运营模式创新,发展具有高适灾韧性的城市新型基础设施。

地下物流系统(Underground Logistics System, ULS)作为一种具有高适灾韧性的新型公共设施,其通过的多层级地上-地下协同货运网络,能够高效衔接物流园区和货运需求点,具有完美匹配城市级别的大规模应急需求的潜力。此外,基于24 h全天候的智能化独立运营,ULS也可以有效避免外界干扰,具备高可靠性。

在系统可行性方面,ULS已在纽约^[5]、伦敦^[6]、上海^[3]、南京^[7]的等多个城市的规划与实践中得到广泛论证。成本-效益分析结果显示,相较于地面运输,ULS在运输效率和运营成本方面具有显著优势。梁承姬等^[8]的研究表明,在上海实施ULS可将运输时间和城市交通拥堵分别降低83%和20%。Zahed等^[9]关于地下物流系统成本的研究显示,ULS的综合成本约为传统城市物流的34.3%。依托智能化物流技术的推广以及地下空间开发技术的成熟,ULS在技术上也已经初步可行^[10]。尤其是,我国在大型地下基础设施开发领域具有充足的实践经验和领先的工程技术,具备发展ULS的能力^[11]。总体而言,地下物流被认为是提升城市物流绩效的重要途径。

近年来,ULS的研究与应用已经成为国际范围内的热点话题^[12-13]。作为一种解决城市交通问题的创新手段,ULS吸引了来自美国^[14]、中国^[15]、德

国^[16]、荷兰^[17]和日本^[18]的研究人员和从业者的关注。在研究内容方面,国内外早期的研究主要围绕常态化运行场景,更多地聚焦于地下空间规划与利用^[11]、概念设计^[17]以及可行性研究^[10]等方面。近年来,研究者开始考虑系统功能集成,并关注多维场景下的运作机制^[3]、网络规划^[15]和成本-效益评估^[19],以完善系统设计。Chen等^[13]提出了依托ULS开展城市应急物流管理的设想。Xu等^[20]从时间、成本、订单完成率、客户剥夺成本等多角度分析了ULS的应急服务能力的影响因素。尽管应急情景下针对ULS系统设计的相关研究呈现增长趋势,但是考虑应急服务能力的网络布局设置和运作过程设计、多灾种下的应急服务能力评价方法等角度的研究仍然欠缺。

应急物流服务能力是指物流系统通过提供应急物流服务,满足城市应急物流需求的能力^[21]。当前,对城市应急物流服务能力的研究主要聚焦于时效性评价^[22]、满足率^[23]、运输成本^[4]、剥夺成本和货运公平性分析^[20]等方面。此外,引入诸如无人车^[24]、无人机^[25]、地下货运系统^[20]等物流新模式和新业态,成为应急研究领域的重要研究内容。

作为一种集“高抗干扰货运+便捷转运+高效末端配送”等特征于一体的网络化城市基础设施,在复杂的应急场景下其应急物流网络与运作机制如何?如何系统性评估其应急服务能力?仍然尚未得到充分明晰。因此,本文以应急服务能力提升为导向,通过识别影响ULS应急服务能力的关键因素,分析基于ULS的应急服务网络结构及其运作流程,并提出应急服务能力评估模型,以期为促进城市应急管理现代化建设提供地上-地下空间协同利用新思路。此外,将ULS相关研究拓展至应急领域进一步丰富了其作为公共基础设施的基本职能,也为提升其基础设施网络规划设计适用性提供理论支撑。

1 地下物流系统应急服务能力内涵与影响因素分析

根据Xu等^[20]的观点,ULS应急服务能力是指

在突发灾害中满足应急物资运输需求的地下货运服务质量。当前,效率、效力和公平性是衡量 ULS 应急物流能力的关键维度^[21-22]。效率主要指以救灾系统成本为基础的经济性,通常通过运输成本和剥夺成本来衡量;效用则是服务质量的核心指标,通常通过响应时间和需求满足程度来评价;公平性主要聚集于受灾者在援助中获得平等待遇,可通过物资需求分配差异或应急物资交付时间差异来衡量。在这些度量标准的基础上,从网络结构和系统调度两方面分析应急物流能力的影响路径,是科学评估 ULS 应急能力的关键。

网络结构对 ULS 应急服务能力具有重要影响,特别是在物流网络的拓扑和规模方面。网络拓扑的连通性和冗余性直接决定了应急物流系统的运行效能。城市应急物流供应链中的关键节点(如物资仓储点和物流配送中心)及末端受灾需求节点(如医院和应急避难场所)的连通性和覆盖度极大影响了应急响应的效率。因此,规划具有一定冗余的地下通道和节点对于提升系统的鲁棒性和连通性至关重要。同时,网络规模也决定了系统对突发物资需求的应对能力。ULS 网络应覆盖城市主要应急物资供应点和需求区域,从而满足潜在的应急服务需求。

系统运行调度对 ULS 应急物流服务能力的影响主要体现在运输和货运节点处理两个方面^[20]。在运输环节,ULS 从常态运行转变为应急状态时,运营计划和调度模式的变更可能导致物流作业中断或延迟。外界因素(如自然灾害或设备故障)也会干扰地下运输设备的正常运行。此外,在货运节点处理方面,自动化设备的故障和仓储作业中的物资积压对物资的转运和供应有一定负面影响。因此,确保设备的正常运转和及时处理货物积压对提升应急物流系统的效能至关重要。

2 地下物流系统应急网络与运作流程

2.1 应急网络设置

ULS 是连接城市物流设施与终端需求点的大规模地下货运网络。由此在应急情景下,各层设施之间需高效衔接,以集约化、智能化的方式将各类应急物资输送至受灾需求点。为明晰城市应急物流网络中各类物流设施的定位,以及 ULS 设施与其对应关系,本文进一步构建了考虑应急需求特征的地下物流系统层次网络(图 1),并对相关设施的概念和特征进行统一界定。

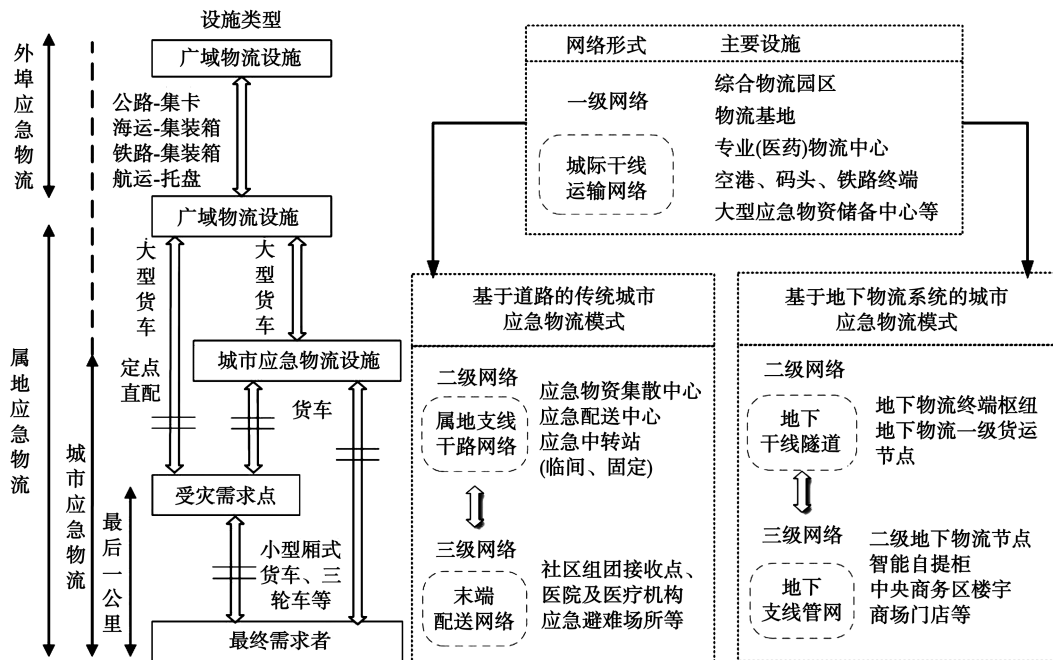


图 1 城市应急物流网络设置

Fig. 1 Development of urban emergency logistics network

地下物流系统应急网络分为三级网络。第一级网络主要负责城市区域内应急物资的集结和供给,通过接驳隧道连接 ULS 货运终端(Terminal,

TM)和大型应急物资仓储点、专业物流中心和货运场站(如公路、铁路和空港)。第二级网络主要负责市区不同组团间的货物运输,通过地下干线隧道

连接 TM 和不同的地下物流一级节点 (Primary Hub Node, PN)。PN 具备自动化装卸、仓储等功能。第三级网络主要通过两种方式负责组团内部的货物运输:一是通过地下支线管网连接 PN 和地下二级节点 (Second Hub Node, SN), SN 设置在货运需求点附近, SN 在完成货物拆装箱后通过地面配送将货物运输至货运需求点 (Demand Point, DP);二是直接通过地面配送方式,将货物运输至离 PN 节点较近的货运需求点。

2.2 运作流程设计

地下物流的公共基础设施属性使其在“平时”可用于城市常态化物流配送,“急时”则转变为应急物资运输供应系统。在应急情景下,原有的地下物流业务暂停或延缓,优先执行应急物资保障运输工作。此外,为反映应急物资的流动逻辑和应急需求的场景,图 2 描绘了灾后城市物流的复杂需求结构和种类。根据应急物资从起始点至目的地 (Origin-Destination, O-D) 的流量关系,这些物资被划分为三个主要类别:医疗卫生物资、生活保障物

资和抢险救灾物资。需要注意的是,某些货物类型(如化石能源、易燃易爆危险品及大型机械设备等)不适用于 ULS 运输,仍需依靠传统的地面配送。根据应急物流的 O-D 特征,需综合利用 ULS 基础设施网络和地面交通运输体系,构建地面-地下耦合的城市应急物流系统。图 3 显示了地下物流应急网络的关键运作流程,以便清晰地阐述灾后 ULS 网络化运作的完整响应过程,在前端接驳网络中,应急物资的交付方式与供需距离有关。对于供需距离较短的节点,优先采用地面运输方式将零散包裹从应急储备仓库运送至灾区。对于供需距离较长的节点,则优先使用 ULS 进行配送。然而,由于既有的 ULS 规划和实践往往以市场需求为开发导向,很少考虑应急需求,相关的应急物流供应节点(如大型应急物资仓储点、专业物流中心等)也未纳入其网络范畴,因此采用 ULS 应急配送模式需要考虑前端地面接驳,即由货运卡车将应急物资从城市郊区的供应节点运送至一级地下物流枢纽节点。

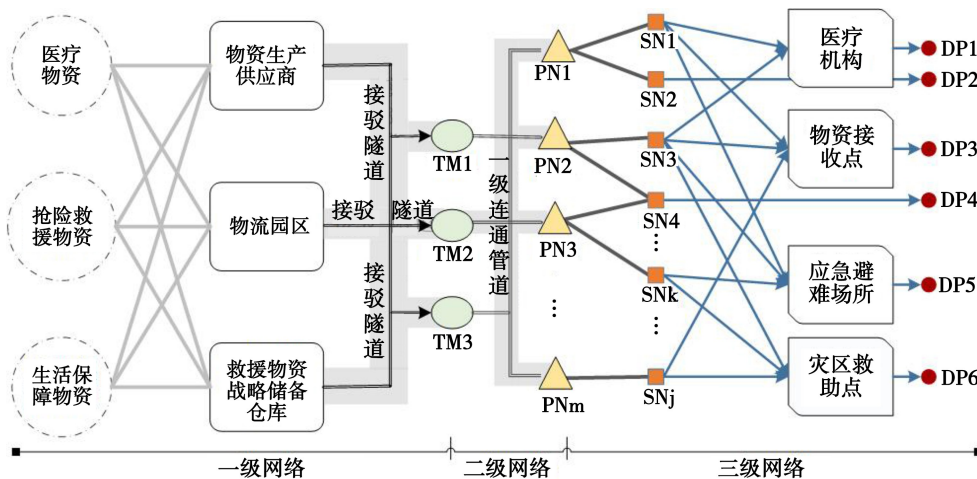


图 2 城市应急物流供需关系示意

Fig. 2 Supply and demand for urban emergency logistics

在应急物流干线网络中,非紧急物资将在供应节点被筛选,剩余的应急物资进行标准化处理。随后,满载应急物资的货运机车通过地下干线网络将应急物资运送至地下物流一级节点或转运节点。在节点处,货物通过自动搬运设备完成装卸作业,之后机车继续行驶。

在应急物流末端网络中,货物首先在装卸货平台完成卸载后再经历识别、水平/垂直运输、拆分等必要物流作业,形成标准化托盘包裹,最后利用地面配送车辆(如微型电动货车、无人配送车等)送达附近的受灾需求点。

3 地下物流应急服务能力评估模型

3.1 应急服务能力评估框架

本节根据应急物流的内外部环境和运行特征,构建了一个包含 4 个步骤的城市应急物流服务能力评估框架(如图 4):(1)构建应急能力度量指标模型;(2)设置多元应急物流运行场景;(3)根据对照原则,确立地面应急物流和 ULS 应急网络双评估对象;(4)设计求解算法,计算应急网络的服务能力及变化趋势。

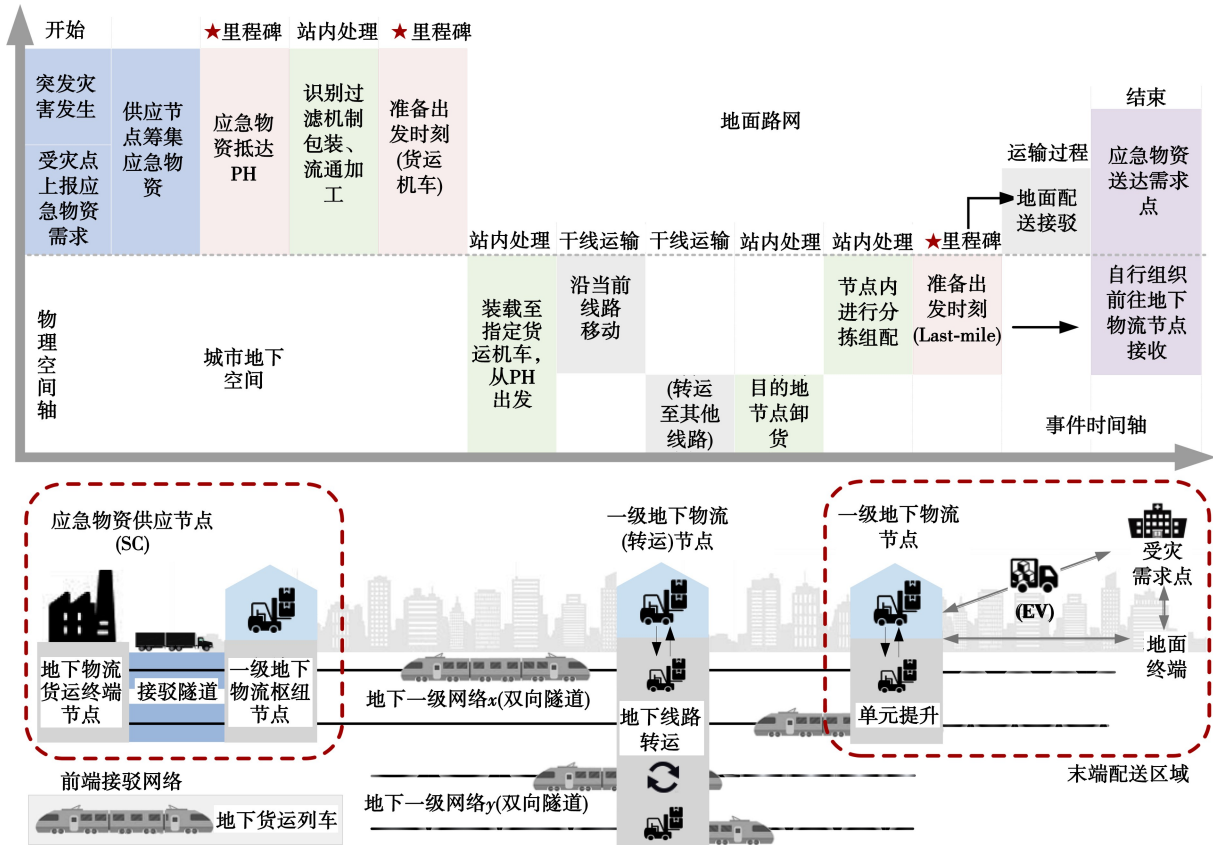


图 3 考虑应急需求的地下物流系统运输流程(进城货流视角)
 Fig. 3 Transport process in ULS considering contingency demand

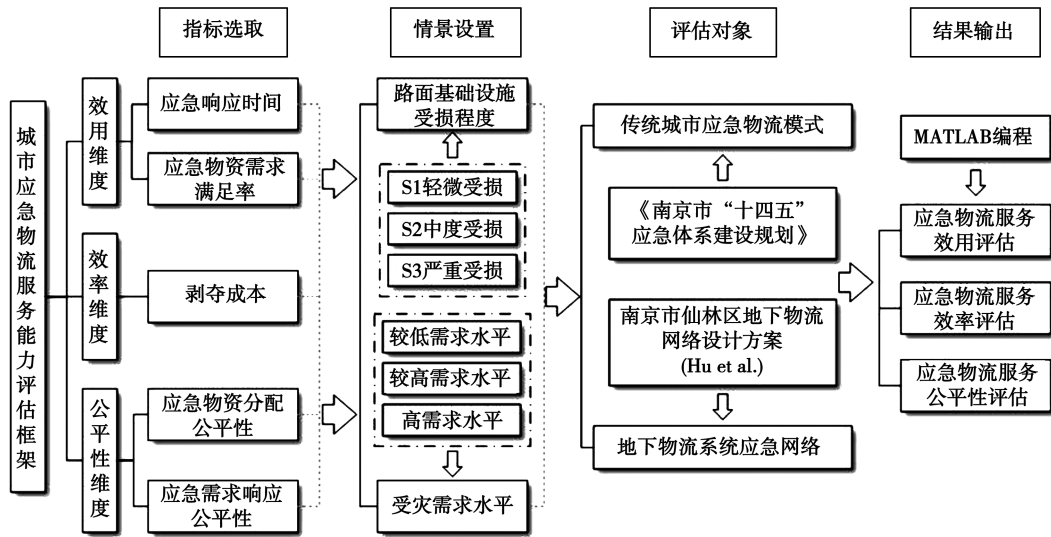


图 4 城市应急物流网络服务能力评估流程
 Fig. 4 Assessment process of urban emergency logistics network performance

3.2 应急服务能力度量指标模型

根据以上对地下物流系统应急服务能力内涵与影响因素的分析,研究从系统运行效率、效用及公平性 3 个维度构建了包括应急响应时间、需求满足率、剥夺成本、物资分配公平性和交付时间公平性在内的地下物流系统应急服务能力度量体系。

指标来源如表 1 所示。

3.2.1 应急物流系统响应时间

(1) 地下物流系统的应急响应时间
 时效性是应急物流区别于商业物流最主要的特征,该指标主要考察货物在整个运输过程种耗费的总响应时长。根据运作流程设计方案(图 3),

表1 城市应急物流服务能力评价指标体系
Table 1 Index system for assessing urban emergency logistics

指标		来源
效用	应急响应时间	Acimovic, 2016 ^[26] ; Yang, 2022 ^[27]
	需求满足率	Rivera, 2020 ^[28]
效率	剥夺成本	Pérez, 2016 ^[29] ; Khodae, 2022 ^[30]
公平性	应急物资分配	Huang K, 2019 ^[31]
	应急需求响应	Huang K, 2019 ^[31]

ULS 应急网络涉及前端地面接驳、隧道地下运输和末端配送多个物流过程,因此模型将供应节点至地下物流货运枢纽的前端接驳运输时间 TT_{front} 、地下隧道运输时间 TT_{trunk} 、出地后的末端配送时间 TT_{terminal} 以及地下物流网络节点处的物流作业时间 TT_{node} 纳入总应急响应时间范畴。单位包裹的应急响应时间 $\overline{TT}_{\text{ULS}}$ 的计算方式如式(1)所示。其中, TT_{node} 为地下物流网络节点处的物流作业时间。

$$\overline{TT}_{\text{ULS}} = \frac{TT_{\text{front}} + TT_{\text{trunk}} + TT_{\text{terminal}} + TT_{\text{node}}}{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} d_{sj}} \quad (1)$$

前端接驳运输时间 TT_{front} 是指采用包括地面车辆或地下货运机车两种运输方式开展应急运输消耗的时间。因此,模型涉及运输方式选择的决策,如公式(2)所示,当供应点不存在连通隧道,需采用地面车辆接驳运输时, θ_{sj}^1 为零。其中, d_{sj} 为从应急物流供应节点 s 至需求点 j 之间的物资需求量; D_{sk} 为应节点 s 至地下物流枢纽节点 k 的地下直连通道的运输距离; $v_c^u v_{sj}^{g,0}$ 分别为表示前端接驳载具和地面卡车的行驶速度。

$$TT_{\text{front}} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} (d_{sj} D_{sk} \theta_{sj}^1 + d_{sj} D_{sk} (1 - \theta_{sj}^1))}{[\theta_{sj}^1 \cdot v_c^u + (1 - \theta_{sj}^1) \cdot v_{sj}^{g,0}]} \quad (2)$$

TT_{trunk} 为货运机车在 ULS 干、支线网络内的行驶时间,其计算公式如式(3)所示。其中, D_{sj}^p 、 D_{sj}^s 分别为 d_{sj} 在干线、支线网络中历经的距离; v_t^u 、 v_a^u 则分别为运输载具在干、支线网络中行驶的速度。

$$TT_{\text{trunk}} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{(j,k) \in R} D_{sj}^p \cdot \gamma_{sjkm} \cdot d_{sj}}{v_t^u} + \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{(k,m) \in T} D_{sj}^s \cdot \eta_{sjkm} \cdot d_{sj}}{v_a^u} \quad (3)$$

TT_{terminal} 表示货物在末端配送过程中消耗的时间,应急物资由地下货运机车运抵距离受灾点最近的 ULS 节点后,再由地面车辆进行配送,如式(4)所示。其中, D_{jm}^p 和 D_{jm}^s 分别表示一级节点 k 、二级节点 m 到需求点 j 的欧式距离。 μ_{kj} 和 δ_{mj} 为 $0 \sim 1$ 的变量,分别代表 d_{sj} 是否经过地面路径 k 、 m 运输至需求点 j 。

$$TT_{\text{terminal}} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{(m,j) \in U} d_{sj} (D_{jm}^p \cdot \mu_{jk} + D_{jm}^s \cdot \delta_{jk})}{v_{sj}^{g,0} \cdot \xi} \quad (4)$$

节点处理作业时间 TT_{node} 由应急物资的在供应节点的装卸时间及在枢纽节点的分拣及拆包时间构成,如公式(5)所示。

$$TT_{\text{node}} = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} d_{sj} \cdot (THT + UHT + SHT) + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{sj} \cdot \gamma_{sjkm} \cdot \tau_u \quad (5)$$

(2) 传统城市物流应急响应时间

$\overline{TT}_{\text{TR}}$ 表示传统模式下单位包裹的应急响应时间,可由总响应时间除以救援周期内的总货运量得到,计算方式为:

$$\overline{TT}_{\text{TR}} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(\frac{z_{sj}}{v_{sj}^{g,0} \cdot \xi} + d_{sj} \cdot \tau_g \right) \cdot \sigma_{sjk}}{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} d_{sj}} \quad (6)$$

传统应急物流的总响应时间 TT_{TR} 由应急物资运输时间和装卸时间两部分构成,计算方式如式(7)所示。其中, ξ ($\xi \in [0, 1]$) 为道路延误系数,用于表征灾后路面的损伤对车辆行驶速度的影响; z_{sj} 为应急物流供应节点 s 至需求点 j 之间的地面运输距离; $v_{sj}^{g,0}$ 表示正常状态下地面货运卡车行驶速度。

$$TT_{\text{TR}} = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(d_{sj} \cdot \frac{z_{sj}}{v_{sj}^{g,0} \cdot \xi} + d_{sj} \cdot \tau_g \right) \cdot \sigma_{sj} \quad (7)$$

3.2.2 需求满足率

需求满足率 χ_j^w 通过计算各个需求点所获得的实际货物量与需求量之间的比值取得,如式(8)所示。其中, x_{sj}^w 为第 w 时段从供应节点 s 分配给受灾需求节点 j 的物资数量; h_j^w 为需求节点 j 的实际应急物资需求量。

$$\chi_j^w = \frac{\sum_{s \in S} x_{sj}^w \cdot \sigma_{sj}}{h_j^w} \quad (8)$$

3.2.3 剥夺成本

本文采用 Holguín-Veras 等^[32] 和 Paul 等^[33] 提

出的剥夺成本量化方法,以线性分段函数刻画灾民因缺乏救援物资所导致的心理负担。同时,根据 FEMA 的统计数据,受灾群众的基准剥夺时间被设置为 390 min,如公式(9)所示。

$$f(t) = \begin{cases} 0.3t & 0 \leq t \leq 130 \text{ min}, \\ 39 + 4.9(t - 130) & 130 \leq t \leq 260 \text{ min}, \\ 676 + 11.3(t - 260) & 260 \leq t \leq 390 \text{ min}, \\ 2145 + 28.3(t - 390) & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

剥夺成本 DC 量化方法如式(10)所示。其中, $Q_{sj}(\tau) = \{0, 1, \dots, q_{sj}(\tau)\}$ 为供应节点 s 到需求节点 j 的所有路径集合; θ_{l^*} 为剥夺成本函数在阶段 l^* 和 $l^* + 1$ 之间的斜率; u_{l^*} 表示函数间断点; $\beta_{ikmj}(\tau)$ 表示 τ 情景下需求节点 j 的受灾群众接收到供应节点 s 的应急物资所等待的时间。

$$DC = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{g \in Q_{sj}(\tau)} \left[f(\mu_{l^*}) + (\beta_{sjg}(\tau) - \mu_{l^*}) * \theta_{l^*} \right] d_{sj} \quad (10)$$

3.2.4 物资分配公平性

物资分配公平性 VAR_{fill} 由所有受灾点的应急物资需求满足率与平均需求满足率 $\bar{\chi}^w$ 的方差表示,如式(11)所示。方差越小,则认为系统具有更好的公平性。

$$VAR_{fill} = \frac{\sum_{j \in J} \widetilde{\chi}_j^w}{J - 1} = \frac{\sum_{j \in J} (\chi_j^w - \bar{\chi}^k)^2}{J - 1} \quad (11)$$

平均需求满足率 $\bar{\chi}^w$, 根据第 w 时段各受灾点的需求满足率 χ_j^k 计算,如式(12)所示。其中, $\|J\|$ 为需求点的数量。

$$\bar{\chi}^w = \frac{1}{\|J\|} \sum_{j \in J} \chi_j^w \quad (12)$$

3.2.5 交付时间公平性

交付时间公平性 VAR_{time} 由各受灾点交付时间的方差来表示,如式(13)所示。 \overline{TT} 为平均交付时间; TT_j 为需求点 J 的应急物资交付时间,它在两种模式下的计算方法如式(13)——(19)所示。

$$VAR_{time} = \frac{\sum_{j \in J} (TT_j - \overline{TT})^2}{J - 1} \quad (13)$$

(1) 地下物流系统应急模式

基于 ULS 的应急物资平均交付时间 \overline{TT}_{ULS} , 通过计算各受灾需求点 j 交付时间的平均值取得,如式(14)所示。其中, TT_j^{ULS} 为需求点 j 的应急物资交付时间(见式(15)),它由供应点 j 到达需求点 S 的最长供应时间决定。

$$\overline{TT}_{ULS} = \frac{\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} TT_j^{ULS}}{\|J\|} \quad (14)$$

$$TT_j^{ULS} = \text{MAX}\{TT_{sj}^{ULS}\} \quad (15)$$

TT_{sj}^{ULS} 为 ULS 应急模式下供应点 s 至需求点 j 的物资交付时间,其由前端接驳运输时间、地下隧道运输时间、末端配送时间、地下物流网络节点物流作业时间 4 项组成,如式(16)所示。

$$TT_{sj}^{ULS} = \frac{D_{sk} \theta_{sj}^1}{v_c^u} + \left(\frac{D_{sj}^p \cdot \gamma_{sjkm}}{v_1^u} + \frac{D_{sj}^s \cdot \eta_{sjkm}}{v_a^u} \right) + \frac{D_{jm}^p \cdot \mu_{jk} + D_{jm}^s \cdot \delta_{jk}}{v_{sj}^{g,0} \cdot \xi} + (\tau_s^{op} + \tau_1^{op} + \tau_2^{op} + \sum_{k \in K} d_{sj} \cdot \gamma_{sjkm} \cdot \tau_u) \quad (16)$$

(2) 传统物流应急模式

传统物流的应急物资平均交付时间 $\overline{TT}_{Tradition}$, 如式(17)所示。其中, $TT_j^{Tradition}$ 表示所有受灾需求点 j 的应急物资交付时间(见式(18))。

$$\overline{TT}_{ULS} = \frac{\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} TT_j^{ULS}}{\|J\|} \quad (17)$$

$$TT_j^{Tradition} = \text{MAX}\{TT_{sj}^{Tradition}\} \quad (18)$$

$TT_{sj}^{Tradition}$ 传统物流模式下供应点 s 至需求点 j 的物资交付时间,如式(19)所示。其中, z_{sj} 表示供应节点 s 至需求点 j 的运输距离; τ_g 为地下物流节点的单位货物装卸时间。 σ_{sj} 为 0-1 变量,用于表示 d_{sj} 是否由供应节点 s 运输至需求点 j 。

$$TT_{sj}^{Tradition} = \sum_{r \in R} \left(d_{sj} \cdot \frac{z_{sj}}{v_{sj}^{g,0} \cdot \xi} + d_{sj} \cdot \tau_g \right) \cdot \sigma_{sj} \quad (19)$$

4 地下物流系统应急服务能力分析

4.1 案例设置与求解算法设计

4.1.1 案例背景与仿真场景

南京市仙林区位于江苏省南京市东北部,总面积为 294 km²,人口密度约为 2 501 人/km²,经济活动集中。根据《南京市突发事件应急预案》及相关公告,研究区域内共有 110 个城市应急需求节点,包括 5 类设施节点,其中 14 个应急避难场所、11 所医院、85 个社区物资接收点。区域内的 4 个应急物资供给设施主要包括:市级大型应急物资储备点(SC1)、应急物资配送中心(SC2 及 SC3)和区级专业应急物资储备点(SC4)。应急设施和需求点的基本布局如图 5(a)所示。

研究选择地面卡车配送即传统应急模式和 ULS 作为仿真对象。两种模式的运作过程如图 5

所示。其中,传统应急物流模式主要基于城市地面路网和货运卡车开展物资配送,而地下物流应急模

式则以地面-地下相结合的方式完成应急物流服务。

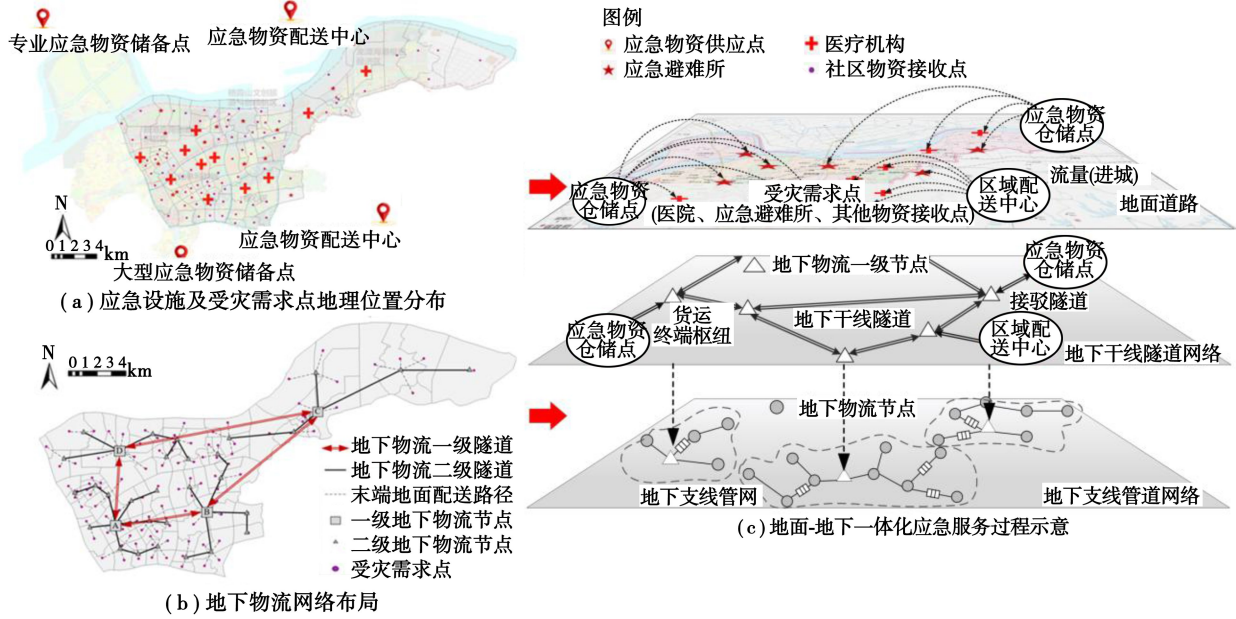


图 5 南京市仙林地区应急物流系统仿真场景

Fig. 5 Simulation scenario of emergency logistics system in Xianlin, Nanjing

值得注意的是,为了确保案例设置的真实性和有效性,有关 ULS 通道布局和节点位置等网络参数的设置与 Hu 等^[15]优化得到的南京市仙林区地下物流网络数据保持一致,如图 5(b)所示。其中,ULS 的运输制式在干线隧道采用 CargoCap (80 km/h) 编组运输技术;在支线管道采用 AGV (60 km/h) 运载小车进行运输;末端则采用地面配送方式 (40 km/h)。根据 Hu 等^[15]和 Xu 等^[20]的研究,评估过程中涉及的主要运行参数如表 2 所示。

表 2 应急能力评估的基本参数设置

Table 2 Basic parameters for emergency capability assessment

变量	取值	变量	取值
c_{sk}^u	0.15 元/公里·包裹	τ_1^{op}	15 分钟/包裹
c_{sj}^g	0.49 元/公里·包裹	τ_2^{op}	5 分钟/包裹
v_e^u	60 公里/小时	τ_s^{op}	10 分钟/包裹
$v_{sj}^{g,0}$	40 公里/小时	τ_g	0.1 分钟/包裹
v_t^u	80 公里/小时	$\ J\ $	110 个

在评估情景方面,研究从应急物资需求强度和基础设施损伤等级(受灾程度)两个维度设置了 $3 \times 3 = 9$ 种不同应急情景,以评估灾害等级对应急物流服务能力的动态影响。一方面,根据 Ertem 等^[34]的受灾需求标准,设定了 3 种灾害等级下的

应急需求水平:a) $\Psi_1 = 0.03$,一般突发事件下少部分人需应急服务;b) $\Psi_2 = 0.08$,较大突发事件下较高比例人群需应急服务;c) $\Psi_3 = 0.13$,重大突发事件下大部分人需应急服务。另一方面,基于 Zhu 等^[35]的场景设置方法,采用速度衰减系数表征基础设施损伤程度:a) 基础设施不受损 ($\xi_1 = 1.0$),应急车辆以正常速度运行;b) 基础设施轻微受损 ($\xi_2 = 0.8$),车辆速度为正常运输速度的 0.8 倍;c) 基础设施中度受损 ($\xi_3 = 0.5$),车辆速度为正常运输速度的 0.5 倍。

此外,通过对南京市 2011—2022 年自然灾害的分析获取应急需求数据,并参考 Yu^[36]和 Golabi^[37]的研究,选取受灾区域常住人口的 3‰ 作为模拟的受灾比例。结合历史数据,设定了各受灾点的三角模糊需求量,从而计算出救灾点的物资总需求,并生成相应的货运 O-D 量。模糊处理流程及 OD 数据见附录 I。

4.1.2 算法设计

基于以上案例环境,利用 MATLAB 对城市应急服务能力进行计算,具体算法步骤总结如下:

Step 1: 构建传统应急物流网络及 ULS 网络,确定需求点的集合 J ,设置货物流量矩阵 Q 。

Step 2: 初始化网络货运 O-D,按照最可能值权重法对三角模糊数的处理方法,设定置信水平 α ,将物资需求量参数去模糊化,得到需求量确定值 \tilde{H}_j ,并确定任意供应节点 s 与需求节点 j 之间的分

配流量 p 。

Step 3: 预处理距离参数。编入 Dijkstra 最短路径算法计算流量在任意两点之间的行驶时间最短路径集合 X 。

Step 4: 系统运行效率评估。针对物流网络的实际情况,基于运载车辆在不同场景、不同链路上的平均行驶速度,通过计算流量 p 的运行时长 T_p^1 , T_p^2 评估各节点接受货物的响应时间。并判断不同时刻需求节点 j 是否完成接收流量 p , 根据公式(8)计算需求满足率。

Step 5: 系统运行效用评估。针对 T_p^1, T_p^2 所处剥夺成本函数的阶段,根据公式(9)计算需求点的剥夺成本。重复 Step 4 和 Step 5 直至流量 p 配送全部结束,转入 Step 6。

Step 6: 系统运行公平性评估。确定所有需求节点 j 运行效率的平均水平,并根据公式(11)、(13)计算差异性。

Step 7: 直至遍历集合 J 中所有元素,评估流程结束,并输出结果。

4.2 应急服务效用分析

4.2.1 响应时间

图 6 展示了不同应急需求水平和基础设施损伤组合情景下的响应时间变化趋势。由于地面基础设施受损或交通管制都可能导致拥堵或中断,相比于 ULS 实施场景,传统应急模式运输时间延长现象较为显著。以图 6(a)为例,在基础设施轻微

受损状态即 ξ_2 场景下,传统应急模式的平均响应时间增加 14.1%,而 ULS 应急网络仅增加 4.2%。虽然数据统计发现,货物的地下化运输需经由 ULS 的多层级网络,其平均货物运输距离相比传统模式增长 10.7%。然而得益于线路的稳定运行,ULS 仍然具有显著的响应时间优势。

需要注意的是,随着基础设施受灾程度的进一步加剧,两种应急物流模式的平均运输时间会呈现突增现象。由此可见,虽然 ULS 运行组织受地面干扰影响较小,然而以地面配送为主的末端配送形式仍然是提升其应急服务能力的关键瓶颈。因此,如何通过运输技术、流程管理和网络优化等手段完善“最后一公里”配送过程是亟待解决的关键问题。

通过对比不同需求下的仿真结果(图 6(b))可以发现,在较高需求强度下($\psi_3 = 0.13$),ULS 仍然能够保持高效的货物运输。以高需求水平高地面路网损坏程度这一极端场景($\psi_3 = 0.13, \xi_3 = 0.5$)为例,ULS 的响应时间相比于传统应急模式提升了 26%。

总体而言,两种场景参数对应急服务响应时间指标的影响水平差异并不显著。随着需求强度和受灾程度的提升,城市应急物流网络的平均响应时间均会大幅增加。此外,与传统应急物流模式相比,地下化运输具有明显的效率优势。

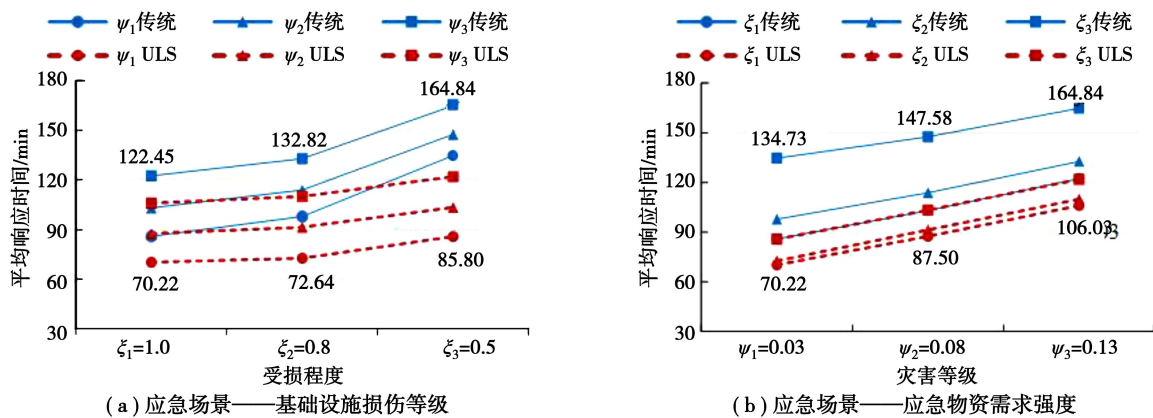


图 6 应急响应时间评估结果

Fig. 6 Results of emergency response time assessment

4.2.2 需求满足率

不同灾后发生时刻下(2 小时末和 3 小时末)的平均需求满足率如表 3 和表 4 所示,ULS 实施绩效均高于传统模式。以基础设施不受损场景为例,在低货运需求情景下,灾害发生 2 h 后,ULS 应急网络和传统模式分别有 85.5%和 88.2%需求点配

送完成,差异并不明显。然而,在高货运需求场景下,ULS 应急网络在 2 h 后有 73.6%需求点正常配送,而传统模式在 3 h 后才能达到同样水平。因此,即使在地面基础设施完好的情况下,传统配送模式仍然难以高效应对货运激增情况。相反,ULS 则相对维持较高的物流服务水平。

表 3 传统应急模式的需求满足率

Table 3 Demand fulfillment rate of traditional emergency mode

需求水平	受灾程度	$t_1 = 2 \text{ h}$		$t_1 = 3 \text{ h}$	
		平均满足率/%	需求点数量	平均满足率/%	需求点数量
$\Psi_1 = 0.03$	$\xi_1 = 1.0$	97.4	94	99.1	105
	$\xi_2 = 0.8$	94.1	87	98.2	91
	$\xi_3 = 0.5$	76.7	25	94.1	72
$\Psi_2 = 0.08$	$\xi_1 = 1.0$	90.4	85	95.3	101
	$\xi_2 = 0.8$	86.7	77	94.4	95
	$\xi_3 = 0.5$	55.9	20	87.8	63
$\Psi_3 = 0.13$	$\xi_1 = 1.0$	80.0	68	91.3	82
	$\xi_2 = 0.8$	75.5	60	89.6	49
	$\xi_3 = 0.5$	40.8	18	81.1	55

表 4 ULS 应急网络的需求满足率

Table 4 Demand fulfillment rate of ULS emergency network

需求水平	受灾程度	$t_1 = 2 \text{ h}$		$t_1 = 3 \text{ h}$	
		平均满足率/%	需求点数量	平均满足率/%	需求点数量
$\Psi_1 = 0.03$	$\xi_1 = 1.0$	98.3	97	99.3	109
	$\xi_2 = 0.8$	98.0	97	99.3	109
	$\xi_3 = 0.5$	97.7	94	99.0	104
$\Psi_2 = 0.08$	$\xi_1 = 1.0$	91.6	87	96.7	104
	$\xi_2 = 0.8$	91.0	87	97.0	104
	$\xi_3 = 0.5$	90.2	85	95.7	100
$\Psi_3 = 0.13$	$\xi_1 = 1.0$	87.4	81	92.7	97
	$\xi_2 = 0.8$	86.5	78	92.1	96
	$\xi_3 = 0.5$	83.2	71	91.1	93

此外,随着地面路网受灾程度的提升,ULS 在最极端的仿真情景下仍然能够在 3 h 内完成 70.9% 需求点的及时配送,平均满足率高达 86.5%。与之对应传统模式仅满足 16.4% 的需求点,平均满足率也大幅降低至 40.8%。虽然随着货运时间的延长,传统地面配送绩效有所提升。然而在灾后发生 4 h 内,ULS 在平均满足率和需求点满足程度上仍然相比于传统模式分别提升了 11% 和 74.5%。

综合表 3 和表仿真数据可以得出,得益于互联互通的地下运输网络和独立运行免受地面干扰的运营模式,ULS 的货运需求满足率从货运总量以及配送范围等方面都远远优于传统卡车配送。尤其在面对高地面交通恶化程度以及窄应急需求时间窗要求的情况下,ULS 的优势愈发明显。此外,相比于响应时间,ULS 在需求满足方面的绩效更为

突出。

值得注意的是,应急场景参数对传统应急模式和 ULS 应急模式的需求满足率指标的影响存在差异。具体而言,传统应急模式对受灾程度场景参数的变化反应更加灵敏,而 ULS 应急网络的需求满足率则随着需求水平的提升而显著下降。

4.3 应急服务效率分析

剥夺成本的变化趋势如图 7 所示。仿真结果显示,随着货运需求的增加,两种应急模式下的剥夺成本都呈现数量级增长,远超货运需求的增长比例。此外,ULS 模式下的剥夺成本整体上小于传统卡车货运,但是两者之间的差距随着货运需求增长而逐渐减小,尤其在高需求水平情景下 ULS 的剥夺成本优势并不明显。类似于上文响应时间的分析讨论结果,上述现象产生的原因仍然归结于在 ULS 基础设施网络物流作业能力的有限性。货运激增会导致严重的货运积压和配送延迟,从而带来巨大的剥夺成本。因此,提升 ULS 基础设施网络节点的中转或末端物流作业能力成为提升系统应急服务能力的关键。

总体而言,相较于受灾程度参数,应急需求因素的变化对剥夺成本的影响更为显著。此外,随着需求水平的提升,不同场景下的剥夺成本呈现出了数量级上的差异。

4.4 应急服务公平性分析

4.4.1 应急物资分配公平性

本文主要依据《南京市“十四五”应急体系建设(含安全生产)规划》,通过计算 3 h 内的需求满足率方差来衡量各需求点的物资分配差异。方差越小,表示物资分配的公平性越高。

图 8 展示了需求满足率方差随需求和地面基础设施损坏程度的变化趋势。两种应急模式在物资分配公平性指标上的表现均受到需求水平参数的显著影响。相较于传统应急模式,ULS 应急网络在提升应急物资分配公平性方面具有明显的优势。具体而言,在低受灾需求水平下,随着基础设施受灾程度的加深,传统应急模式的需求满足率方差不断增大,其平均值约为 ULS 应急网络的 2.2 倍。随着货运需求的增长,在高受灾需求水平下,传统模式的方差从 0.114 增加至 0.159,而 ULS 应急网络的方差则在 0.085 至 0.1 之间波动。虽然两种应急模式之间的差异存在缩小趋势,ULS 相较于传统应急模式在物资分配公平性方面仍有 25.4% 至 35.2% 的绩效提升。此外,通过对比相同货运需求下不同的地面基础设施损坏程度的仿真结果可以得出,随着地面路网受损程度的加剧,ULS 相比于卡车配送的绩效提升效果愈发明显。

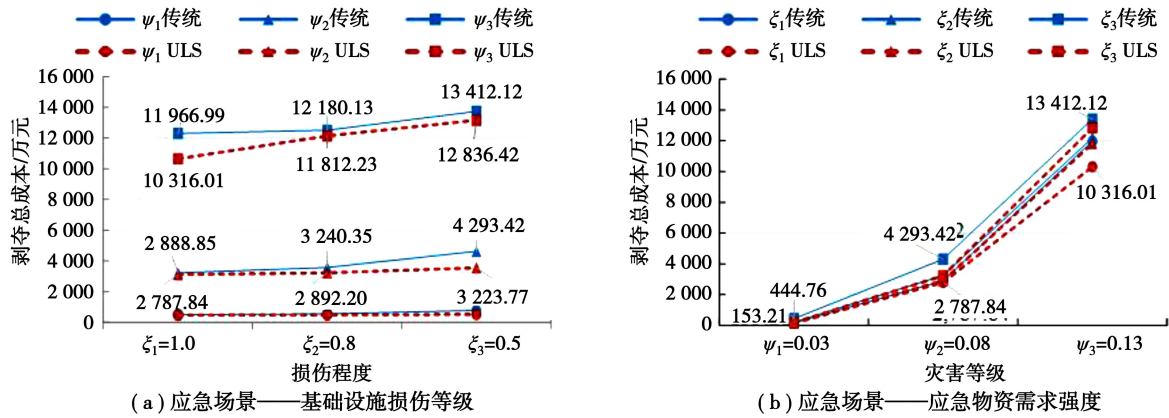


图 7 不同应急模式的剥夺成本

Fig. 7 Deprivation costs of different emergency modes

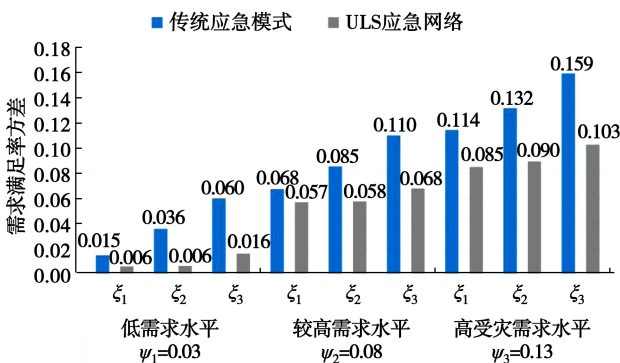


图 8 应急物资需求满足率方差

Fig. 8 Variance of the satisfaction rate of emergency material demands

4.4.2 应急需求响应公平性

图 9 显示了在较高受灾需求水平 S_D^2 和基础设施未受损 S_R^1 的场景下,各需求点应急响应时间的分布情况。结果表明,ULS 实施下的需求点应急响应时间总体而言优于传统应急模式。然而,部分需求点之间的差异性较小。以图中最高点(85 号需求点)为例,其在传统应急模式下的最长响应时间为 215.2 min,比该模式的平均响应时间 103.03 min

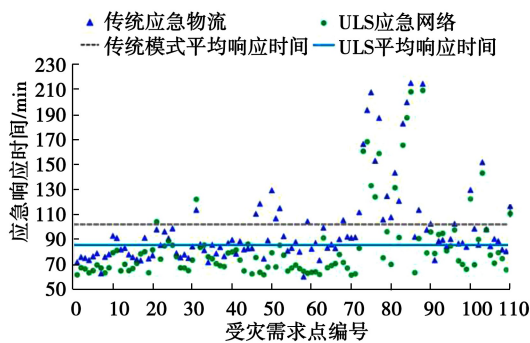


图 9 较高受灾需求水平场景下应急响应时间

Fig. 9 Emergency response time in scenarios with high disaster demand levels

高出 108.9%。然而,若采用 ULS 应急网络,该需求点的响应时间也仅能减少 9.8%。距离因素是影响其响应时间的主要原因。该需求点距离供应点最远且对应急物资保有大量需求,导致 ULS 配送仍需大量时间。因此,在 ULS 网络设计中应统筹考虑整体公平性和区域公平性,需针对应急配送中难以到达的地区制定更为合理的运输方案。

5 结论与建议

研究分析了应急情景下的地下物流网络结构与其运行组织流程,并从效用、效率和公平性 3 个维度构建了城市应急物流服务能力评估模型。研究不仅丰富了地下物流系统的知识体系,也为城市应急物流效能提升提供了新思路和新方法。基于南京仙林案例设置了不同应急需求和地面交通情况下的仿真模拟场景,对比分析了 ULS 和传统地面卡车配送的应急服务效能,具体结论如下:

(1) 需求水平和基础设施损伤程度对不同物流模式的影响效用差异明显。其中,基础设施受损对传统物流模式的影响更为突出。需求水平的波动则对地下物流应急网络产生更大影响。由于地下物流系统容量的有限性,急剧增长的货运需求同资源调度与配送能力之间的矛盾愈发突出。

(2) 基于灵活且稳定的地下化运行模式, ULS 在效用、效率和公平性方面相比于地面卡车配送都有极大提升。

(3) 考虑到节点物流作业能力的有限性,应急货运需求的增长会削弱 ULS 货运优势。提升节点作业能力冗余是保障 ULS 应急服务效能的关键。

(4) 地面交通程度的恶化虽然一定程度上会影响 ULS 的末端配送过程,进而增加响应时间和剥夺成本。然而,得益于免受地面干扰的高密度地下货运网络,ULS 的需求满足率优势则会随之提升。从物流效用和公平性维度考量,ULS 更加适用

于地面交通不畅及较窄的应急需求时间窗要求下的应急情景。

(5) ULS 具有较强的货运整体公平性,但其局部公平性仍有待提升,尤其考虑到偏远地区同应急物资供应点之间具有较长距离。

面向 ULS 应急服务能力提升,提出了如下建议:

(1) 网络设置:需要基于应急需求时空分布情况、偏远地区货运可达性等因素,合理规划网络覆盖范围、区域节点的规模和密度,增强应急配送能力。此外,需综合考虑常态化物流和应急物流功能属性,针对 ULS 网络进行一体化设计,在部分关键节点可预先设置应急物资仓库。

(2) 运行组织:应根据货运时间窗要求、货运满足公平性需求等因素,设计响应不同受灾情景的应急方案。例如针对部分受灾严重区域,可采用跨站运行模式,从而减少局部区域的响应时间和剥夺成本。

(3) 地上-地下协同运输:基于 ULS 和地面卡车配送模式,构建城市层面的应急管理平台,统筹优化应急物流运作全过程,确保在突发事件中的全天候、无干扰的运输服务。

参考文献 (References)

- [1] 国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(6): 30-48. (State Council. Circular of the state council on printing and issuing the plan for building the national emergency response system during the 14th five-year plan period [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2022, (6): 30-48. (in Chinese))
- [2] 何静, 朱双凯, 任晔. 不确定条件下地铁应急储备点优化配置研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(5): 152-157. (He Jing, Zhu Shuangkai, Ren Ye. Optimal allocation of the subway's emergency reserve point in uncertain conditions [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(5): 152-157. (in Chinese))
- [3] Hou L L, Hu W J, Chen Y C, et al. Measuring effectiveness of metro-based underground logistics system in sustaining city logistics performance during public health emergencies: a case study of Shanghai [J]. Transportation Research Record, 2024, 3(5): 36-52.
- [4] 王妍妍, 孙佰清. 多受灾点应急物资动态多阶段分配模型研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(10): 138-47. (Wang Yanyan, Sun Baiqing. Dynamic multi-stage allocation model of emergency materials for multiple disaster sites [J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(10): 138-47. (in Chinese))
- [5] Najafi M, Kaushal V, Visser J. Operational planning and design considerations for underground logistics transportation in Texas [J]. Infrastructures, 2024, 9(8): 130.
- [6] Visser J G. The development of underground freight transport: an overview [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 123-127.
- [7] Liu Q, Chen Y, Hu W, et al. Underground logistics network design for large-scale municipal solid waste collection: a case study of Nanjing, China [J]. Sustainability, 2023, 15(23): 16392.
- [8] 侯雨婕, 梁承姬. 基于地下物流系统的集装箱多式联运网络优化[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(2): 314-25. (Hou Yujie, Liang Chengji. Optimization of container multimodal transport network based on underground logistics system [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(2): 314-25. (in Chinese))
- [9] Zahed S E, Shahooui S, Farooqi F, et al. Life-cycle cost analysis of a short-haul underground freight transportation system for the DFW Airport [J]. Built Environment Project and Asset Management, 2019, 9(3): 440-56.
- [10] 林锦辉, 胡万杰, 董建军, 等. 基于动态可靠性评价的城市地下物流网络设计[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1062-1074. (Lin Jinhui, Hu Wanjie, Dong Jianjun, et al. Design on urban underground logistics network based on dynamic reliability evaluation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(4): 1062-1074. (in Chinese))
- [11] 秦博宇, 龚丹丹, 陈志龙. 中国城市地下空间开发利用助力低碳发展现状、策略与构想[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(7): 1337-55. (Qin Boyu, Gong Dandan, Chen Zhilong. Current situation, strategy, and conception for exploiting and using urban underground spaces for low-carbon development in China [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(7): 1337-55. (in Chinese))
- [12] 王晓平, 鲁玮, 李睿麒等. 基于地下物流系统的地铁货运文献综述[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(增2): 534-539, 48. (Wang Xiaoping, Lu Wei, Li Ruiqi, et al. Literature review of metro freight based on subway transportation system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(Supp. 2): 534-539, 48. (in Chinese))
- [13] Chen Z, Don J, Ren R. Urban underground logistics system in China: opportunities or challenges? [J]. Underground Space, 2017, 2(3): 195-208.
- [14] Rezaeifar F, Najafi M, Kaushal V, et al. Development of a model to optimize the operations of an intermodal underground logistics transportation [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(4): 04022039.

- [15] Hu W, Dong J, Hwang B-G, et al. Network planning of urban underground logistics system with hub-and-spoke layout: two phase cluster-based approach [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020, 27(8): 2079-2105.
- [16] Hu H, Wang J. Research on the design and sustainable evaluation of metro-based underground logistics systems [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 67600-67612.
- [17] Zhang H, Lv Y, Guo J. New development direction of underground logistics from the perspective of public transport: a systematic review based on scientometrics [J]. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3179.
- [18] Youn S J, Lee Y J, Han H E, et al. A data analytics and machine learning approach to develop a technology roadmap for next-generation logistics utilizing underground systems [J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): 6696.
- [19] Pan X, Dong J, Ren R, et al. Monetary evaluation of the external benefits of urban underground logistics system: a case study of Beijing [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 136: 105094.
- [20] Xu Y, Dong J, Ren R, et al. The impact of metro-based underground logistics system on city logistics performance under COVID-19 epidemic: a case study of Wuhan, China [J]. *Transport policy*, 2022, 116: 81-95.
- [21] Wang H, Ma X. Research on multi-objective location of urban emergency logistics under major emergencies [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021(1): 5577797.
- [22] Sarma D, Das A, Bera U K. Uncertain demand estimation with optimization of time and cost using Facebook disaster map in emergency relief operation [J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 87: 105992.
- [23] Wang S L, Sun B Q. Model of multi-period emergency material allocation for large-scale sudden natural disasters in humanitarian logistics: Efficiency, effectiveness and equity [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 85: 103530.
- [24] 胡卉,唐子淇,刘富鑫,等. 疫情下医用防护物资“无接触”配送优化[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(5): 152-163. (Hu Hui, Tang Ziqi, Liu Fuxin, et al. Optimization of contactless distribution of medical protective materials during the outbreak of spreading epidemic disease [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(5): 152-163. (in Chinese))
- [25] 刘长石,吴张,周愉峰,等. 疫区应急物资供应的卡车-无人机动态协同配送路径优化[J]. *系统科学与数学*, 2022, 42(11): 3027-3043. (Liu Changshi, Wu Zhang, Zhou Yufeng, et al. The optimization of dynamic and cooperative truck-drone distribution routes for emergency supplies delivery in pandemic areas [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2022, 42(11): 3027-3043. (in Chinese))
- [26] Acimovic J, Goentzel J. Models and metrics to assess humanitarian response capacity [J]. *Journal of Operations Management*, 2016, 45: 11-29.
- [27] Yang Y, Ma C, Zhou J, et al. A multi-dimensional robust optimization approach for cold-chain emergency medical materials dispatch under COVID-19: a case study of Hubei province [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 9(1): 1-20.
- [28] Rivera D, Galindo G, Yie R. Planning the delivery of relief supplies upon the occurrence of a natural disaster while considering the assembly process of the relief kit [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, 69: 100682.
- [29] Perez N, Holguin J. Inventory-allocation distribution models for postdisaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs [J]. *Transportation Science*, 2016, 50(4): 1261-1285.
- [30] Khodaei V, Kayvanfar V, Haji A. A humanitarian cold supply chain distribution model with equity consideration: The case of COVID-19 vaccine distribution in the European Union [J]. *Decision Analytics Journal*, 2022, 4: 100126.
- [31] Huang K, Rafiei R. Equitable last mile distribution in emergency response [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 887-900.
- [32] Holuin-veras J, Perez N, Jaller M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models [J]. *Journal of Operations Management*, 2013, 31(5): 262-280.
- [33] Paul J A, Zhang M. Supply location and transportation planning for hurricanes: a two-stage stochastic programming framework [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 274(1): 108-125.
- [34] Ertem M A, Akdogan M A, Kahya M. Intermodal transportation in humanitarian logistics with an application to a Turkish network using retrospective analysis [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 72: 102828.
- [35] Zhu L, Gong Y, Xu Y, et al. Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority [J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 283: 1573-1606.
- [36] Yu L, Zhang C, Yang H, et al. Novel methods for resource allocation in humanitarian logistics considering human suffering [J]. *Computers & industrial engineering*, 2018, 119: 1-20.
- [37] Golabi M, Shavarani S M, Izbirak G. An edge-based stochastic facility location problem in UAV-supported humanitarian relief logistics: a case study of Tehran earthquake [J]. *Natural Hazards*, 2017, 87: 1545-1565.