

中文引用格式:宋英华,敬文霞,吕伟,等. 考虑多路径组合的城市应急疏散路径规划[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 134-141.

英文引用格式:SONG Yinghua, JING Wenxia, LYU Wei, et al. Urban emergency evacuation path planning considering multi-path combination[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 134-141.

考虑多路径组合的城市应急疏散路径规划*

宋英华^{1,2}教授, 敬文霞^{1,2}, 吕伟^{**1,2}教授, 汪京辉^{1,2},
赵梦涵^{1,2}, 林皓澜^{1,2}

(1 武汉理工大学 中国应急管理研究中心, 湖北 武汉 430070;

2 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号:X915.2

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1661

基金项目:国家自然科学基金资助(52072286);中央高校基本科研业务费(2024AQYJA10)。

【摘要】 为缓解单条最短路径上因疏散需求激增导致的潜在拥堵问题,利用地理信息系统(GIS)、Dijkstra算法和Yen算法,考虑拥堵因素规划多路径组合疏散方案。首先,利用Dijkstra算法和Yen算法计算得到多个起点到多个终点的 k 条最短疏散路径;然后,组合各路径集合中的 k 条最短路径,得到不同的疏散路径组合方案;最后,分流组合路线中的重叠路段流量,进而找出最优的疏散路径组合方案。结果表明:通过组合疏散路径,可以得出多源多汇场景下的多条最短疏散路径;考虑重叠路段对疏散的影响,更符合实际情况,可以形成最优的疏散路径组合方案。

【关键词】 疏散路径组合方案; 应急疏散; 路径规划; Dijkstra算法; 重叠路段

Urban emergency evacuation path planning considering multi-path combination

SONG Yinghua^{1,2}, JING Wenxia^{1,2}, LYU Wei^{1,2}, WANG Jinghui^{1,2},
ZHAO Menghan^{1,2}, LIN Haolan^{1,2}

(1 China Emergency Management Research Center, Wuhan University of Technology,
Wuhan Hubei 430070, China; 2 School of Safety Science and Emergency Management,
Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to alleviate the potential congestion problem caused by the sharp increase in evacuation demand on a single shortest path, the multi-path combined evacuation planning scheme considering congestion factors was studied by using Geographic Information System (GIS), Dijkstra algorithm and Yen algorithm. Firstly, the Dijkstra algorithm and the Yen algorithm were used to calculate k shortest evacuation paths from multiple starting points to multiple endpoints. Then, the k shortest paths in each path set are combined with each other to form different evacuation path combination schemes. Finally, the traffic flow of the overlapping sections in the combined route was diverted to reduce congestion, and the optimal combination scheme of evacuation paths was identified. The simulation results

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0134-08; 收稿日期:2025-02-07; 修稿日期:2025-04-10

** 通信作者:吕伟(1989—),男,河南信阳人,博士,教授,主要从事城市公共安全风险分析、应急资源与人员安全保障(应急交通物流、应急疏散、避难安置)、公共交通风险评估、交通流及行人动力学方面的研究。E-mail: weil@whut.edu.cn。

show that through calculation, the number of the shortest evacuation paths between each starting and ending point and the total number of evacuation path combination schemes can be obtained. Considering the impact of overlapping sections on evacuation is more in line with the actual situation and can form the optimal combination scheme of evacuation paths.

Keywords: combination scheme of evacuation routes; emergency evacuation; route planning; Dijkstra algorithm; overlapping road sections

0 引言

近年来,自然灾害事件频发,严重威胁社会经济稳定和人民生命财产安全。灾害事件一旦发生,疏散需求会在短时间内骤增,极易导致疏散路线拥堵,进而严重影响疏散效率。因此,科学规划疏散路径、减少拥堵对疏散效率的影响具有重要意义。

从本质上来说,疏散效率依赖于从受灾地到安全地的疏散路径的科学规划。大多数与灾害相关的报道表明:应急疏散过程中疏散需求激增容易导致拥堵,进而影响疏散效率^[1-2]。学者们针对疏散路径规划问题已开展了相应的一些研究。VICTOR等^[3]提出一种基于冲突的疏散路径规划方法,将疏散规划问题分解为每个疏散区域生成新的疏散路径和优化疏散人流并生成疏散计划,该方法能够缩短疏散时间,提高疏散效率。姜雪等^[4]利用改进的自适应蚁群算法研究商业步行街的大规模人群疏散,发现所提疏散方案可显著提升整体疏散效率,有效缓解部分安全出口的人员滞留问题。杨剑锋等^[5]以城市内某大学校园为例,研究地震灾害的城市人员密集区域的应急疏散路线规划问题,重新分配疏散过程中出现成拱现象的出入口处的人群,得到3种优化方案。LIM等^[6]考虑道路容量的不确定性,提出一个基于可靠性的疏散路径规划模型,该模型能够找到疏散路径数量、清空时间与拥堵概率之间的关系。KIM等^[7]以最小化疏散时间为目标,通过逆流方式减少疏散过程中的拥堵,提出贪心启发式和瓶颈缓解启发式2种方法生成不同的疏散路径。HOSSEINI等^[8]以总疏散时间最小、火灾暴露威胁最小、拥堵程度最小为目标构建一种路径优化模型,该优化模型能大大减轻拥堵严重程度,同时把火灾暴露威胁和总疏散时间保持在最低水平。李清泉等^[9]从减轻拥堵的角度,建立考虑个体需求的时空拥挤度的应急疏散路径分配方法,并以武汉沌口体育中心及其周边路网为例进行验证,发现该方法能够缓解路网上的拥堵,并为每个疏散个体分配疏散路径。

上述研究考虑拥堵因素时,主要聚焦于寻找合理的应急疏散路径。然而,在应急疏散过程中,单条疏散路径可能因拥堵等因素引发更高风险^[10]。因此,部分学者提出规划 k 条潜在备选路径以提升疏散效率。CAMPOS^[11]基于第 k 条最短路径,构建了以更大通行能力和更短行驶时间为目标的模型。STEPANOV等^[12]提出一种基于M/G/c/c状态相关排队模型的最优出口路径分配方法,运用 k 最短路径算法计算所有潜在出口路径,并借助仿真模型MGCCSimul评估疏散计划的清空时间、行驶距离及拥堵程度,最后确定最优出口路径。HE Yunyue等^[13]提出一种基于 k 条最短路径的疏散模型,该模型采用显示拥塞控制优化疏散路线和警力资源分配,不仅能为疏散人员提供清晰的疏散路径,还能减缓瓶颈路段的交通压力。DUAN Xianghao等^[14]基于拥堵指数约束,提出一种两阶段优化模型和算法,第1阶段结合salp算法和Dijkstra算法获取多条备选路径,第2阶段改进salp算法以确定最优救援路径。何健飞等^[15]针对地铁疏散拥堵问题,运用复杂度更低的拍卖算法计算前 k 条最短路径并构建疏散路径选择集合,该疏散路径优化方法能够有效减轻疏散拥堵,提高疏散效率。ROZO等^[16]提出一种考虑行人路径选择行为和多种路径策略的疏散计划,该计划采用智能体建模方法,包含特定信号以区分拥堵限制,鼓励人们在特定道路拥堵时选择其他路线。

综上,现有研究对于多条疏散路径的研究较少,且对不同路径间的复杂相互作用,如重叠路段的影响,分析不足,难以有效解决疏散路网中的拥堵问题。鉴于此,笔者针对灾害场景下的疏散路径拥堵问题,提出一种多源多汇场景下的多路径组合的应急疏散路径规划方案,该方案考虑重叠路段对疏散路径的影响,基于Dijkstra算法和Yen算法,通过分析路段的实时流量,分流处理重叠路段,实现多路径缓解疏散拥堵,提高疏散效率,以期应急疏散场景下的拥堵问题提供理论依据。

1 多路径组合疏散路径规划方案

1.1 疏散路径规划问题的描述

城市道路网络分布复杂,利用图论理论将其抽象为以城市交叉路口为节点,以道路路段为边的拓朴网络结构如图 1 所示。当灾害发生时,受灾人群需要紧急疏散,在疏散路网中根据事先规划好的疏散路径快速撤离。在整个疏散路网中,待疏散点可能多个,同时也会存在多个安置点。为确保疏散者在最短时间内得到安全疏散,不同疏散点的人员应根据规划的疏散路径前往不同的安置点。因此,灾害应急疏散路径规划问题被抽象成一个关于道路交通网络的多源多汇疏散问题。

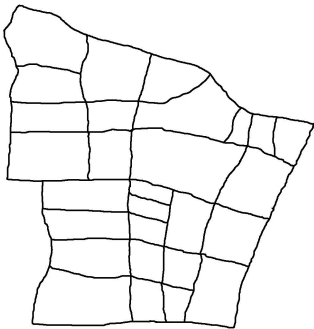


图 1 道路交通网络
Fig.1 Road traffic network

实际疏散时,路段上的流量会随时间变化,通过分析路段的实时流量,将应急疏散问题转化为动态网络交通流分配问题。疏散路网中路段 (i,j) 的疏散流量 q 计算如下:

$$q_{ij}^t = \int_0^t (\lambda_{ij}^t - \theta_{ij}^t) dt + q_{ij}^{t-1} \quad (1)$$

式中: λ_{ij}^t 为 t 时刻路段 (i,j) 的流入量; θ_{ij}^t 为 t 时刻路段 (i,j) 的流出量。

为确保疏散路线容量满足疏散需求且避免拥堵,寻找各起点至终点的 k 条最短路径,构成子路径集,组合子路径集中的路径,生成多个疏散路径组合方案,最终确定最优疏散路径组合方案。

疏散路径规划问题定义如下:

1) 输入。包含疏散网络 G 、待疏散车辆数 Q 、疏散起点 O 和疏散终点 D 。

2) 约束条件。满足流量守恒约束,起点处的待疏散车辆数等于终点处的到达车辆数;满足流量非负约束,所有路径的交通量非负。

3) 输出。输出起点到终点的规划路线和疏散

路径组合方案,包括每条疏散路径的路网节点和道路疏散时间。

4) 优化目标。以疏散路径组合方案的疏散时间 T 最少为优化目标。

假设条件为:

- 1) 各疏散源点的疏散人员同时开始疏散,每个源点 $O_i(i=1,2,3)$ 对应1个终点 $D_j(j=1,2,3)$ 。
- 2) 疏散人员听从指挥,按给定路线疏散。
- 3) 采用车辆疏散,疏散路网受背景交通流量的影响很小。
- 4) 路段车流量遵循先进先出的规则。

1.2 疏散路径组合方案描述

首先,利用 Dijkstra 算法计算每个起点到每个终点的一条最短路径,再通过 Yen 算法得到每个起点到每个终点的 k 条最短路径。以疏散点和安置点分别作为疏散网络的源点和终点,假设路网中包含多个源点和多个终点,分别用 $O_i(i=1,2,\dots,r)$ 和 $D_j(j=1,2,\dots,s)$ 表示。从起点 O_1 到终点 D_1 的最短疏散路径有 k_1 条,起点 O_2 到终点 D_2 的最短疏散路径有 k_2 条,以此类推,起点 O_i 到终点 D_j 的最短疏散路径有 k_i 条。定义从起点 $O_1, O_2, \dots, O_i$ 到对应的终点 $D_1, D_2, \dots, D_j$ 的多条最短路径分别构成子路径集 $p_1, p_2, \dots, p_i$,那么从各起点到各终点获得的所有最短疏散路径构成路径集 $P(P=p_1, p_2, \dots, p_i)$,如图 2 所示。定义 t_{ij} 为车辆经过边 e_{ij} 的通行时间, c_{ij} 为边 e_{ij} 的容量,即道路通行能力。由于路网中有多个起点和多个终点,疏散路径组合方案是从每个 OD 对得出的多条路径中任意选择一条路径进行组合,构成一个疏散路径组合方案 x_i ,所有疏散路径组合方案构成集合 $X(X=x_1, x_2, \dots, x_i)$,那么从 O_i 个起点到 D_j 个终点的总疏散组合方案数共有 $k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i$ 个。

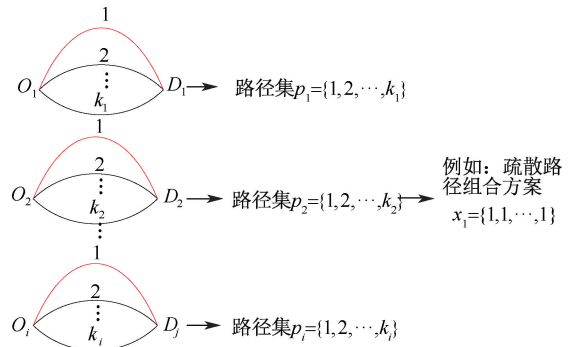


图 2 疏散路径组合

Fig.2 Evacuation path combination

1.3 对重叠路段的解决方案分析

疏散路径组合方案中存在路段不重叠和路段重叠 2 种情况。

1) 若疏散路径组合方案中无重叠路段(图 3), 则该组合方案的疏散时间由疏散时间最长的路径决定, 每条路径的疏散时间取决于该路径的瓶颈流量。由图 3 可知: 从起点 O_{i-1} 、 O_i 、 O_{i+1} 到终点 D_{j-1} 、 D_j 、 D_{j+1} 得出的 3 个疏散路径集 p_{i-1} 、 p_i 、 p_{i+1} 中各任意取一条疏散路径组成一个疏散组合方案, 即 3 条疏散路径 k_{i-1} 、 k_i 、 k_{i+1} 。

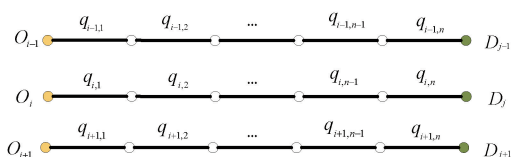


图 3 无重叠路段

Fig. 3 Non-overlapping section

$$t_{i-1} = \sum_{l=1}^T \frac{Q_{i-1}}{\min\{q_{i-1,1}, q_{i-1,2}, \dots, q_{i-1,n}\}} \quad (2)$$

$$t_i = \sum_{l=1}^T \frac{Q_i}{\min\{q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,n}\}} \quad (3)$$

$$t_{i+1} = \sum_{l=1}^T \frac{Q_{i+1}}{\min\{q_{i+1,1}, q_{i+1,2}, \dots, q_{i+1,n}\}} \quad (4)$$

$$t_m = \max\{t_{i-1}, t_i, t_{i+1}\} \quad (5)$$

假设这 3 条路径同时开始疏散且无重叠路段, 则对应疏散时间 t_{i-1} 、 t_i 、 t_{i+1} 按式(2)~式(4)计算, 包含这 3 条路径的疏散路径组合方案的疏散时间 t_m 按式(5)计算。

2) 若疏散路径组合方案中出现多条重叠路段, 则该路段在疏散过程中容易拥堵, 进而影响疏散效率。文中采取分流重叠路段的流量处理拥堵问题。为简化问题, 仅分析重叠最严重的路段, 重叠路段的分流规则如下。

设每个路段的长度为 l , 流量为 q , 容量为 c , 路段 $e_{i-1,1}$ 、 $e_{i,1}$ 、 $e_{i+1,1}$ 的分流系数分别为 $\alpha_{i-1,1}$ 、 $\alpha_{i,1}$ 、 $\alpha_{i+1,1}$ ($0 \leq \alpha_{i-1,1}, \alpha_{i,1}, \alpha_{i+1,1} \leq 1$), 且 $\alpha_{i-1,1} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i+1,1} = 1$ 。根据路段的流量情况赋值分流系数, 路段流量大则分流系数大, 反之亦然。假设任意 3 个路段 $e_{i-1,1}$ 、 $e_{i,1}$ 、 $e_{i+1,1}$ 在路段 $e_{i,2}$ 上重叠, 如图 4 所示。

疏散期间不同时刻, 从路段 $e_{i-1,1}$ 、 $e_{i,1}$ 、 $e_{i+1,1}$ 分出的流量 q_a^t 按下式计算:

$$q_a^t = \int_0^t (q_{i-1,1}^t \times \alpha_{i-1,1}^t + q_{i,1}^t \times \alpha_{i,1}^t + q_{i+1,1}^t \times \alpha_{i+1,1}^t) dt \quad (6)$$

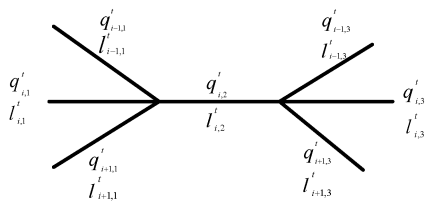


图 4 重叠路段分流措施

Fig. 4 Diversion measures for overlapping sections

分出的流量之和不大于重叠路段的容量, 如下式所示:

$$q_a^t \leq \int_0^t c_{i,2}^t dt \quad (7)$$

在此假设下, 分为路径瓶颈流量在重叠路段和不在重叠路段 2 种情况。

$$t_{i-1,1} = \frac{l_{i-1,1}}{v_{i-1,1}} \quad (8)$$

$$t_{i,1} = \frac{l_{i,1}}{v_{i,1}} \quad (9)$$

$$t_{i+1,1} = \frac{l_{i+1,1}}{v_{i+1,1}} \quad (10)$$

$$t_{i-1} = \sum_{l=1}^T \frac{Q_{i-1}}{t_{i-1,1} / \left(\sum_{n=1}^N t_{i-1,n} \right) \times q_{\min}} \quad (11)$$

$$t_i = \sum_{l=1}^T \frac{Q_i}{t_{i,1} / \left(\sum_{n=1}^N t_{i,n} \right) \times q_{\min}} \quad (12)$$

$$t_{i+1} = \sum_{l=1}^T \frac{Q_{i+1}}{t_{i+1,1} / \left(\sum_{n=1}^N t_{i+1,n} \right) \times q_{\min}} \quad (13)$$

$$t_m = \max\{t_{i-1}, t_i, t_{i+1}\} \quad (14)$$

当瓶颈流量在重叠路段时, 如图 5 所示, 从起点 O_{i-1} 到终点 D_{j-1} 的路径疏散时间按式(8)计算。每个路段的疏散时间为 t , 长度为 l , 行车速度为 v , 每条路径包含的路段数为 n 。式(8)~式(10)分别表示经过路段 $l_{i-1,1}$ 、 $l_{i,1}$ 、 $l_{i+1,1}$ 的时间, 式(11)~式(13)分别表示不同路径上的重叠路段所用的时间, 式(14)表示包含 3 条路径的疏散路径组合方案的疏散时间。

当瓶颈流量不在重叠路段上时, 如图 6 所示, 分别计算重叠路段和瓶颈路段的疏散时间, 取两者最大值。例如, 从起点 O_{i-1} 到终点 D_{i-1} 的路径上, 瓶颈流量出现在其他路段而非重叠路段, 则该路径的疏散时间按式(15)计算。其他起点 O_i 、 O_{i+1} 到终点 D_i 、 D_{i+1} 的路径疏散时间计算原理同式(12)、

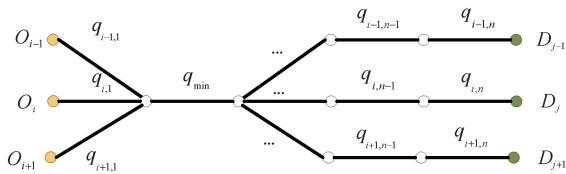


图 5 重叠路段与瓶颈路段相同

Fig. 5 Overlapping sections are the same as bottleneck sections

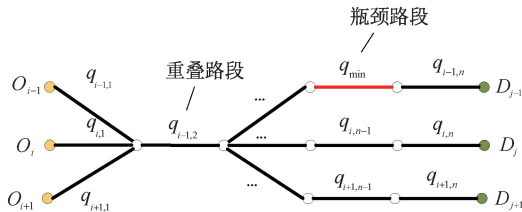


图 6 重叠路段和瓶颈路段不相同

Fig. 6 Overlaps are not the same as bottlenecks

式(13),疏散路径组合方案时间计算原理同式(14)。

$$t_{i-1} = \max \left\{ \sum_{t=1}^T \left(\frac{Q_{i-1}}{\left(\sum_{n=1}^N t_{i-1,n} \right) \times q_{i-1,2}}, \frac{Q_{i-1}}{q_{min}} \right) \right\} \quad (15)$$

1.4 方案设计框架

通过 Dijkstra 算法和 k 最短路径算法求解最优疏散路径组合方案,其设计框架如图 7 所示。

2 多路径组合疏散规划实例分析

2.1 研究区概况

以湖北省武汉市洪山区某区域为例,该区域分布有大型商场、高等院校、重要政府机构等,常住人口较多,人员日常及工作活动频繁。此外,该区域地处亚热带湿润区,降水日数多集中在每年 6—9 月,且地势低洼,易发生洪涝灾害。

该区域的路网数据来源于开放街道地图 (Open Street Map, OSM),通过将疏散区域的各交叉路口抽象为点,各路段抽象为边,并经地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 处理,得出包含 46 个节点和 73 条边的疏散网络,如图 8 所示。同时,通过实地调查、公路设计标准和电子地图获取该区域不同等级道路 (快速路、主干道、次干道、支路) 的长度、通行能力、车道数和设计速度等参数,见表 1。文中假设路网中有 3 个疏散起点和 3 个疏散终点,3 个起点的待疏散车辆数分别为 10 000、21 000、20 000 辆。

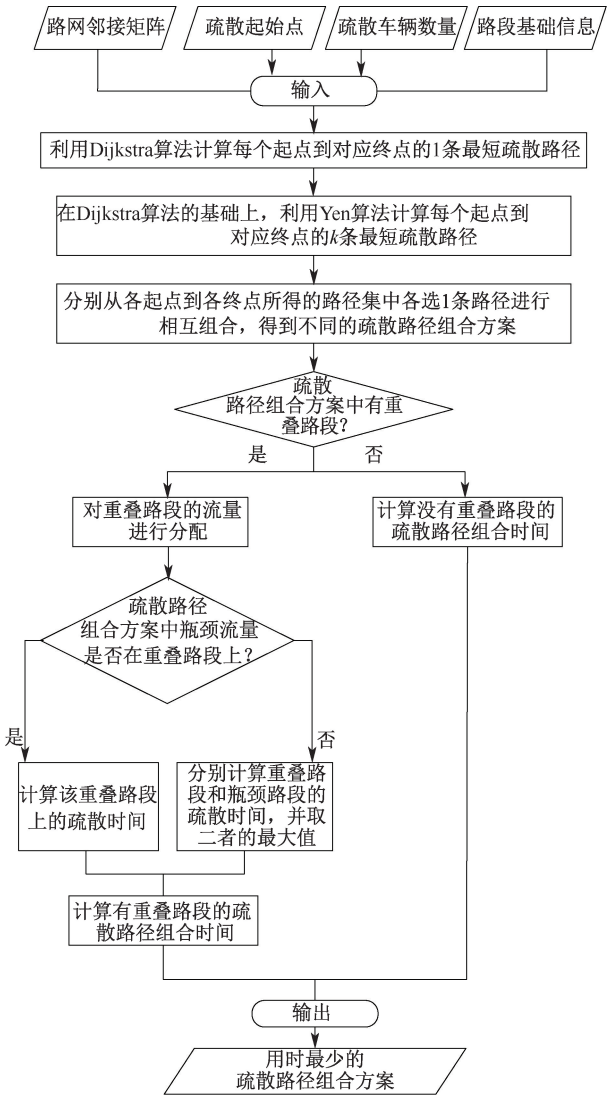


图 7 方案设计框架

Fig. 7 Scheme design framework

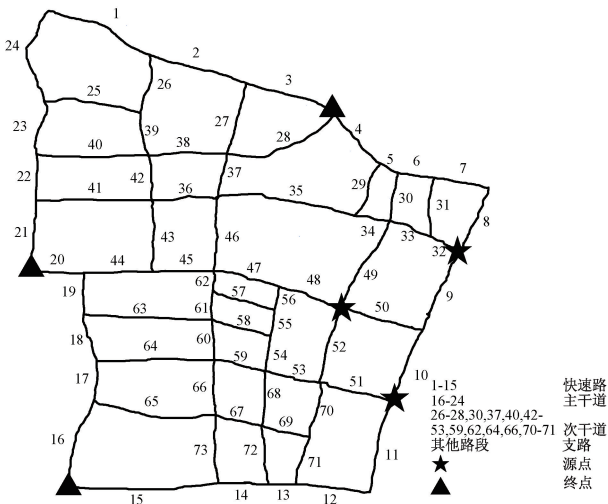


图 8 研究区路网

Fig. 8 Study area network

表 1 研究区路网参数设定

Table 1 Parameter setting of road network in the research area

道路编号	道路等级	道路长度/m	单条道路通行能力/(pcu·h ⁻¹)	车道数	设计速度/(km·h ⁻¹)
1	快速路	980	1 750	6	70
2	快速路	875	1 750	6	70
3	快速路	780	1 750	6	70
4	快速路	570	1 750	6	70
5	快速路	170	1 750	6	70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
69	支路	388	1 300	2	30
70	次干道	460	1 300	4	40
71	次干道	374	1 300	4	40
72	支路	460	1 300	2	30
73	支路	575	1 300	2	30

2.2 疏散路径规划结果分析

计算得到各起点到各终点的疏散路径结果,各起终点间的路径数、经过的路段节点、路径长度见表 2,由表 2 可知:从起点 20 到终点 4 确定了 6 条路径,从起点 26 到终点 21 确定了 7 条路径,从起点 37 到终点 42 确定了 5 条路径。

将疏散路网中的 3 个起点到对应 3 个终点的最短疏散路径相互组合,得到 210 种疏散路径组合方案,每种方案对应的疏散路径序号如图 9 所示,由图 9 可知:疏散路径组合方案 2 由起点 20 到终点 4 的第 5 条最短路径、起点 26 到终点 21 的第 2 条最短路径、起点 37 到终点 42 的第 5 条最短路径组成,总用时最少,为 394.940 5 min。疏散路径组合方案 207 由起点 20 到终点 4 的第 3 条最短路径、起点 26 到终点 21 的第 5 条最短路径、起点 37 到终点 42 的第 2 条最短路径组成,总用时最长,为 3 180.390 6 min。

表 2 各起点到各终点的 k 条疏散路径

Table 2 k evacuation paths from each origin to each destination

起点	终点	路径号	路径	路径长度/m
20	4	1	20→19→18→6→5→4	1 779
		2	20→19→18→17→16→13→4	3 487
		3	20→19→18→17→16→15→12→13→4	4 698
		4	20→19→18→17→5→4	1 957
		5	20→19→7→6→5→4	1 806
		6	20→27→26→25→24→16→13→4	4 519
26	21	1	26→25→24→23→15→14→21	3 812
		2	26→25→24→23→22→21	2 157
		3	26→25→24→23→15→12→11→14→21	4 536
		4	26→25→24→23→15→12→10→9→11→14→21	5 365
		5	26→25→24→16→15→14→21	3 875
		6	26→25→24→28→31→30→22→21	3 535
		7	26→36→35→34→33→30→22→21	3 906
37	42	1	37→36→35→34→33→38→42	3 594
		2	37→36→41→40→39→43→42	3 107
		3	37→36→41→40→44→43→42	3 129
		4	37→36→35→34→39→43→42	3 224
		5	37→46→45→44→43→42	3 319

根据疏散路径组合方案的疏散时间由组合中用时最长的疏散路径时间决定,在考虑重叠路段的影响后,计算得出疏散路径组合方案的疏散时间如图 10 所示。由图 10 可知:疏散路径组合方案 1 和 2 的疏散用时最少,为 200.04 min;而疏散路径组合方案 206~210 用时最多,为 1 455.7 min。

上述分析表明:疏散路径组合方案 1 和 2 的疏散时间最少,为 200.204 min,因此,这 2 组组合方案

为优选方案,具体路径如图 11 所示,由图 11 可知:2 个疏散路径组合方案中包含 2 条相同的疏散路径,仅 1 条疏散路径不同。然而,方案 2 中从起点 37 到终点 42 的第 5 条路径的疏散时间比方案 1 中从起点 37 到终点 42 的第 1 条路径用时更少。若希望疏散路径组合方案中每条路径都用时最少,则疏散路径组合方案 2 为最优方案。

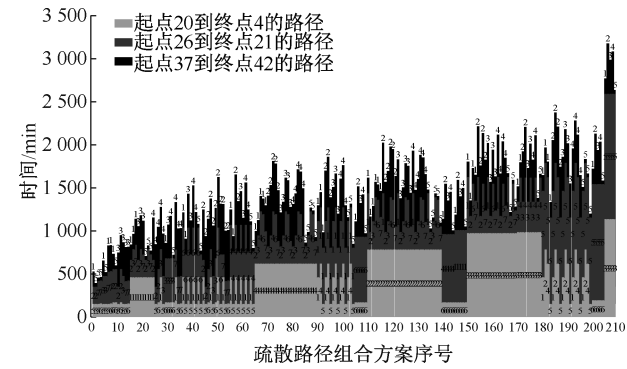


图9 疏散路径组合方案

Fig.9 Evacuation path combination scheme

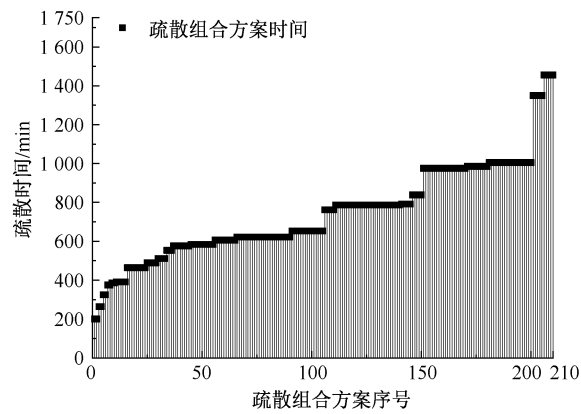
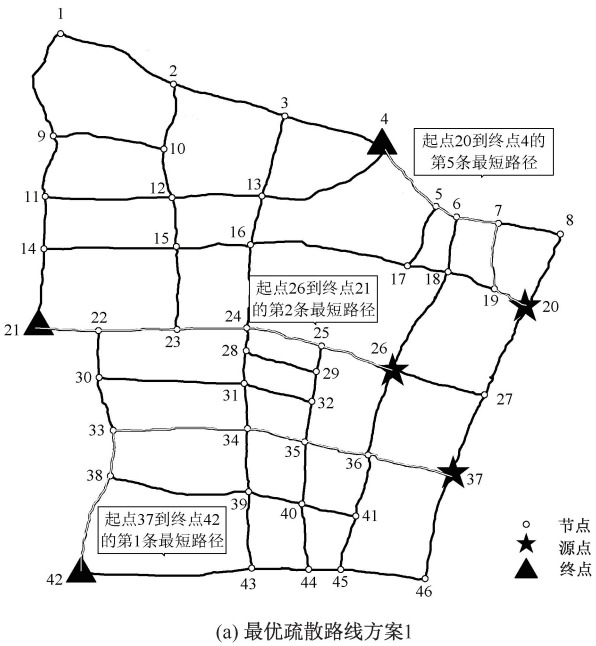
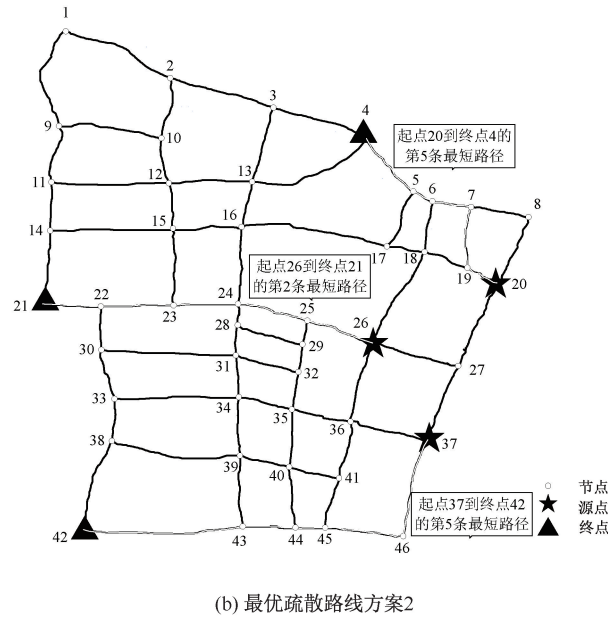


图10 疏散路径组合方案时间

Fig.10 Evacuation path combination scheme time



(a) 最优疏散路线方案1



(b) 最优疏散路线方案2

图11 最优疏散路线方案

Fig.11 Optimal evacuation route plan

3 结论

- 1) 通过组合疏散路径并计算每种方案包含的各疏散路径的疏散时间,为应急疏散场景下的多源多汇提供多条最短疏散路径,使决策人员直观地选择疏散方案。
- 2) 考虑重叠路段对各疏散路径组合方案的影响,对重叠路段采取分流措施,可得到疏散用时最少的路径组合方案。
- 3) 文中仅研究每种组合方案中重叠路段最严重的情况。然而,实际疏散场景中会出现多个重叠路段,探讨重叠路段数量和长度对疏散效率的影响是后续研究的重点。

参考文献

[1] 胡文燕, 李梦雅, 王军, 等. 暴雨内涝影响下的城市道路交通拥挤特征识别[J]. 地理科学进展, 2018, 37(6): 772-780.
HU Wenyan, LI Mengya, WANG Jun, et al. Urban traffic congestion caused by rainstorms and inundation[J]. Progress

- in Geography, 2018, 37(6):772–780.
- [2] 林毓铭, 李瑾. 中国防灾减灾 70 年:回顾与诠释[J]. 社会保障研究, 2019(6):37–43.
LIN Yuming, LI Jin. Disaster prevention and mitigation since the founding of the People's Republic of China for 70 years: review and interpretation[J]. Social Security Studies, 2019(6):37–43.
- [3] VICTOR P, HENTENRYCK P V, EVEN C. A conflict-based path-generation heuristic for evacuation planning[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 83:136–150.
- [4] 姜雪, 杨欢, 张培红. 基于蚁群算法的商业步行街应急疏散决策优化[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 144–151.
JIANG Xue, YANG Huan, ZHANG Peihong. Emergency evacuation decision optimization for commercial pedestrian streets based on ant colony algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10):144–151.
- [5] 杨剑锋, 展慧, 陈良超, 等. 考虑地震灾害的城市人员密集区域应急疏散路线规划[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2022, 62(1):70–76.
YANG Jianfeng, ZHAN Hui, CHEN Liangchao, et al. Planning of emergency evacuation routes in densely populated urban areas during earthquakes[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022, 62(1):70–76.
- [6] LIM G J, RUNGTA M, BAHARNEMATI M R, et al. Reliability analysis of evacuation routes under capacity uncertainty of road links[J]. IIE Transactions, 2015, 47(1):50–63.
- [7] KIM S H, SHEKHAR S, MIN M, et al. Contraflow transportation network reconfiguration for evacuation route planning[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Engineering, 2008, 20(8):1 115–1 129.
- [8] HOSSEINI O, MAGHREBI M, MAGHREBI M F. Determining optimum staged-evacuation schedule considering total evacuation time, congestion severity and fire threats[J]. Safety Science, 2021, 139:1–16.
- [9] 李清泉, 李秋萍, 方志祥. 一种基于时空拥挤度的应急疏散路径优化方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 517–523.
LI Qingquan, LI Qiuping, FANG Zhixiang. An emergency evacuation routing optimization method based on space-time congestion concept[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(4):517–523.
- [10] NIYOMUBEYI O, PILESJO P, MANSOURIAN A. Evacuation planning optimization based on a multi objective artificial bee colony algorithm[J]. International Journal of Geo-Information, 2019, 8(3):1–23.
- [11] CAMPOS V E G. Evacuation transportation planning: a method of identify optimal independent routes[C]. Urban Transport and the Environment for the 21st Century, 2000:555–564.
- [12] STEPANOV A, SMITH J M. Multi-objective evacuation routing in transportation networks[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(2):435–446.
- [13] HE Yunyue, LIU Zhong, SHI Jianmai, et al. K-shortest-path-based evacuation routing with police resource allocation in city transportation networks[J]. PLoS One, 2015, 10(7):1–23.
- [14] DUAN Xianghao, WU Jiaxiang, XIONG Yonglin. Dynamic emergency vehicle path planning and traffic evacuation based on salp swarm algorithm[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022: DOI:10.1155/2022/7862746.
- [15] 何健飞, 刘晓. 基于拥挤度的地铁应急疏散路径优化方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2):166–171.
HE Jianfei, LIU Xiao. A subway emergency evacuation routing optimization method based on congestion degree[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(2):166–171.
- [16] ROZO K R, ARELLANA J, SANTANDER-MERCADO A, et al. Modelling building emergency evacuation plans considering the dynamic behaviour of pedestrians using agent-based simulation[J]. Safety Science, 2019, 113:276–284.



作者简介: 宋英华 (1962—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事公共安全与应急管理、公共管理、协同决策等方面的研究。E-mail: song6688c@163.com。