

# 应急疏散条件下车辆路径问题的多目标优化

郭瑞军, 刘悦, 窦玉林, 刘莹莹

(大连交通大学 交通工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:**近年来,国内外灾害性突发事件频发,有必要提前制定科学合理的应急疏散计划,而应急疏散路线是应急预案的重要组成部分。首先,构建了一个在多目标优化框架下的疏散模型,该模型着手在最短时间内完成疏散和最大限度降低疏散过程中的风险;然后,通过线性加权法的方式对2个目标赋予权重,在考虑疏散路网道路通行能力的前提下,将多目标转化为单目标,并通过Lingo进行求解。针对毒气泄漏事件进行了实例模拟,结果显示,综合考虑风险和时间的双目标的目标值为165.12,相较于只考虑最小风险降低了99。同传统只考虑单一因素相比,优先选择风险和距离较小的路径是相对较优的策略,可综合提高应急疏散的效率,为日后应急疏散方案的制定与演练提供优化思路。

**关键词:**应急疏散;路径优化;多目标模型;线性加权法;Lingo

**中图分类号:** U492.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0091-06

在发生突发灾害时,快速高效的应急运输可以将灾害造成的损失降低。疏散路径规划是一个必要的方面。路径规划重点是在合适时间为每一个疏散对象选择最优的疏散方案。

目前,常见的2种评价原则用于优化应急疏散路径,一种是追求最短疏散距离,另一种是基于最短疏散时间。袁媛等<sup>[1]</sup>将疏散路径的通行速度呈现为时间的关系式,应用改进的Dijkstra算法来寻求最佳路线;CAMPOS et al<sup>[2]</sup>提出了交通应急规划中车辆流量分配 $k$ 最优独立路径的方法;COVA et al<sup>[3]</sup>针对疏散过程中大部分的延误出现在十字路口,研究了一种网络流模型,得出了最佳疏散路径方案。

随着单一目标问题研究的成熟,研究者聚焦于更复杂的多目标研究,建立动态多目标疏散路线选择优化模型<sup>[4-6]</sup>。刘家林等<sup>[7]</sup>考虑疏散规划的风险性和动态性,研究了疏散车队配置与道路分配的多模式联合优化问题;雷斌等<sup>[8]</sup>通过将仿真模拟方法用于构建引导人员位置优化模型与疏散路径优化模型;吴开信等<sup>[9]</sup>针对多源单目标网络且每个OD对之间只有单条路径特殊的拓扑高速公路疏散网络结构,提出兼顾效率和公平的疏散策略;安实等<sup>[10]</sup>在考虑应急车辆容量差异的基础上,构建了多目标的应急疏散车辆调度模型;赵书奇等<sup>[11]</sup>利用社会力模型和AnyLogic仿真模拟软件,对公共场所人员疏散问题进行研究;GIBEOM et al<sup>[12]</sup>提出了一种基于Agent建模的综合辐射应急建模框架;SUN et al<sup>[13]</sup>针对提高核电站应急疏散的效率,设计了基于多智能行人流模拟方法,得到了3类疏散区域的应急行人流方案。

综上,国内外研究对应急疏散模型及应急疏散路径规划等已取得许多进展,但对于疏散方案的系统性研究仍有待加强;研究的动态化有一定局限,较少考虑紧急事件在方向上的区别和随时间推移的危险区域扩大对紧急疏散的影响;另外,由于疏散风险和时间因素互为冲突,同时考虑风险最小和时间最短较难得出有效可行的疏散方案。鉴于此,利用最短时间与最小风险协调最优,综合分析应急交通疏散路径优化问题。研究疏散过程中的每一个对象,并在假设某地化工厂毒气泄漏环境下进行实例仿真分析。

## 1 应急疏散路径规划模型

为了最大程度地减少紧急情况造成的损失,并将受影响的人员快速安全地疏散到安全区域,有必要

收稿日期:2024-09-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20240236

基金项目:2024年度辽宁省地方标准制修订计划项目(2024107)

作者简介:郭瑞军(1977—),男,教授,研究方向为交通运输系统分析、交通管理与控制。E-mail:rjguo@163.com

郭瑞军,刘悦,窦玉林,等.应急疏散条件下车辆路径问题的多目标优化[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(1):91-96.

考虑疏散路径、疏散时间和疏散风险等各个方面。在此基础上建立多目标疏散模型,提出以下假设:①已知突发事件发生位置及影响的范围;②已知需疏散人群数量及所在区域;③所有的疏散个体都能按照应急疏散预案到达指定安全点。

### 1.1 最短时间疏散模型

在实际疏散过程中,选择最短的疏散路线,交通流量在路线上剧增,导致道路拥堵,这反过来会延长疏散时间,甚至会导致疏散失败和二次灾难发生。所以,采取考虑路段通行时间来规划疏散方案较为合理。

假定已明确疏散区域内每条道路的自由流时间,同时考虑到各路段的通行能力以及道路节点的接纳量是受限的,构建最小化疏散时间的目标函数模型

$$\min T = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V t_{ij} x_{nij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^V \sum_{n=1}^N x_{nj} = N \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V x_{ni} = N \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V x_{ni} - \sum_{j=1}^V \sum_{n=1}^N x_{nj} = 0 \quad (4)$$

式中, $T$ 为总疏散时间; $t_{ij}$ 为路段 $ij$ 的通行时间,由BPR函数求得; $N$ 为需要疏散对象的总数; $V$ 为道路网络的交叉节点总数; $n$ 为疏散对象编号, $n=1,2,\dots,N$ ; $x_{nij}$ 为决策变量, $x_{nij}$ 取0或1,当 $x_{nij}$ 取0时,疏散对象 $n$ 的疏散路径不涉及路段 $ij$ , $x_{nij}$ 取1时,疏散对象 $n$ 的疏散路径则包括路段 $ij$ 。

其中目标函数式(1)寻求疏散对象的整体疏散时间最小化;式(2)确保了所有疏散对象都满足应急疏散的要求;式(3)用以保证各个疏散对象均能抵达预定的应急疏散地点;式(4)阐述了道路节点的流量平衡原则。

最短时间疏散模型不仅考虑了逃生路线和疏散时间,同时考虑了道路的承载能力、路况状况、行驶时间以及路段的容量限制等因素,以确保在遭遇紧急情况时,受影响人员能够迅速被引导至安全地带。

### 1.2 最小风险疏散模型

假定在不考虑容量限制的条件下,已知疏散路网全部道路。构建最小风险疏散模型的目标函数

$$\min \text{Risk} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V R_{ij} x_{nij} \quad (5)$$

式中,Risk为总疏散风险; $R_{ij}$ 为道路 $ij$ 路段上的疏散风险值。

其他约束条件与最短路径疏散模型相同,这里不一一列举。

最小风险疏散模型以安全性为出发点,保障了疏散区域内疏散对象的人身安全,降低损失与伤亡。

### 1.3 不同疏散模型的对比

针对各种疏散模型的分析,主要从疏散效率、适用情境以及安全性3个维度展开,如表1所示。

表1 模型对比分析

疏散模型	疏散效率	适用情境	安全性
最短时间模型	在考虑路网利用率和其他相关问题时,把整个过程所用的时间作为目标,疏散效率有所提高。	考虑的影响因素较多,适用范围比较广。	没有直接考虑安全因素,安全效果一般。
最小风险模型	把安全作为出发点,提高了疏散路线的可靠性,疏散效率较高。	适用于对疏散风险值要求较高的情况。	直接考虑安全的问题,安全性较好。

通过对比2种基本的应急疏散模型,从不同目标出发,可以得到相应的疏散方案,在各自研究角度到达疏散最优,但每种模型都有着考虑因素不全面的缺点,适用场景受到限制。针对一些紧急事件,较难准确取得其影响区域的风险值;若不将风险性与距离、时间等目标结合,则可能导致疏散效率降低。应在明

确追求目标重要程度的基础上,将重要疏散目标相结合,以整体函数最优作为制定疏散方案的依据。

## 2 多目标应急疏散模型构建

### 2.1 毒气泄漏后的质量浓度

疏散紧迫度与道路行驶速度和毒性气体浓度紧密关联,预测区域内不同位置的毒气浓度,可以更准确地预测毒气泄漏环境下的道路风险。采用高斯烟羽模型来预测毒性气体的扩散,由于风险值没有定量的计算方法,通过不同位置的浓度表示相应道路的风险值,且毒气浓度与道路风险成正比。

在危险化学品泄漏事故中,固定点源瞬时泄漏要比连续泄漏发生率低 90% 以上,因此研究连续泄漏。高斯烟羽模型常用于研究连续性气体泄漏事件,以此来估算毒气泄漏影响区域内的化学气体浓度

$$C_{(p_x, p_y)} = \frac{Q_G}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{p_y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (6)$$

式中,  $C_{(p_x, p_y)}$  为化学气体在地面任意位置处的质量浓度;  $Q_G$  为气体生成速率(气体泄露速率);  $\mu$  为风速;  $H$  为气体的有效抬升高度;  $p_x$  为到毒气泄漏位置的下风向距离;  $p_y$  为到毒气泄漏位置的横风向距离;  $\sigma_y$  为水平扩散系数,受下风向距离  $p_x$ 、大气稳定度等因素的影响;  $\sigma_z$  为垂直扩散系数,受下风向距离  $p_x$ 、大气稳定度等因素的影响。

### 2.2 目标及约束

根据上述分析,构建双目标应急疏散模型为

$$\min Z = \omega \frac{1}{T^k - T^1} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V \frac{d_{ij}}{v_{nij}} x_{nij} + (1 - \omega) \frac{1}{R^k - R^1} - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V R_{ij} x_{nij} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^V \sum_{n=1}^V x_{nj} = N \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V x_{ni} = N \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^V x_{ni} - \sum_{j=1}^V \sum_{n=1}^V x_{nj} = 0 \quad (10)$$

$$x_{nij} = \begin{cases} 0 & \text{如果疏散对象 } n \text{ 疏散路径不包含路段 } ij \\ 1 & \text{如果疏散对象 } n \text{ 疏散路径包含路段 } ij \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $Z$  为路径阻抗评价函数值;  $\omega$  为权重,  $\omega \in (0, 1)$ ;  $T^k$  为第  $k$  个最短疏散路径通行时间;  $T^1$  为初始最短疏散路径通行时间;  $R^k$  为第  $K$  个最小风险疏散路径的风险值;  $R^1$  为初始最小风险疏散路径的风险值;  $d_{ij}$  为道路  $(a_i, a_j)$  的长度;  $v_{nij}$  为  $t$  时刻车辆  $n$  在路段  $(a_i, a_j)$  上的车速;  $R_{ij}$  为道路  $(a_i, a_j)$  的风险,此处风险用质量浓度表示,即  $R_{ij} = C_{ij}(p_x, p_y)$ ;  $x_{nij}$  为决策变量,若疏散对象  $n$  在  $t$  时刻通过路段  $ij$ ,则取值为 1,否则为 0。

### 2.3 模型求解

运用 Lingo 求解模型分为 2 个部分。确定灾害影响区域内的道路路网后,分别求出路网的最短时间与最小风险路径;多目标优化下的模型构建与上文假设一致,根据目标函数中时间与风险重要程度不同,采用线性加权法,将 2 个目标统一为相对最优的标准并转化为单目标,转化完成的总函数值即为路段的阻抗值。在确定权重时,重点考虑 3 个方面的因素:突发事件的性质、疏散人群的规模以及路网的连通性。

## 3 案例分析

在多目标优化模型的基础上,针对某化工厂可能出现的毒气泄漏场景,采用高斯烟羽模型计算扩散范围,从最基本的车辆疏散角度进行分析,以疏散过程中的人、车辆作为研究对象。

### 3.1 事故概况

某化工厂内一个装有液氯的储罐发生不明原因破裂,泄漏处距离水平地面高度为 30 m,喷出气体高度

为 20 m, 泄漏储罐的液氯装载量为 50 t, 在持续泄漏的情形下, 罐内压强为 0.3 MPa, 尝试各补救措施均未能成功后, 泄漏持续在最初状态, 直到储罐中的氯气完全泄漏结束。液态氯气泄漏的初始情况参见表 2。

表 2 初始参数取值

泄漏速率/( $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	有效源高 $H_e/\text{m}$	风速 $u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风向	大气稳定度
10 000 000	200	1	西南	B

### 3.2 最短时间和最小风险求解

对上述泄漏事故场景影响区域范围进行计算, 由模拟结果可知, 下风向最大高度 6.8 km, 侧风向最远宽度 2.4 km 范围内为重伤区, 需将此范围内的人员及时疏散至安全地点。将氯气的扩散范围与事故影响区域的地理信息图结合起来, 确定人员疏散安全范围。为了最大程度确保疏散人员安全, 选定扩散区域外一点作为疏散的终点, 同时为了减少交叉路口的拥堵, 将主要交叉路口都设定为疏散节点, 为适应应急决策快速求解的需要, 仅将疏散范围的部分区域作为疏散节点, 具体疏散路网信息如图 1、表 3 所示。

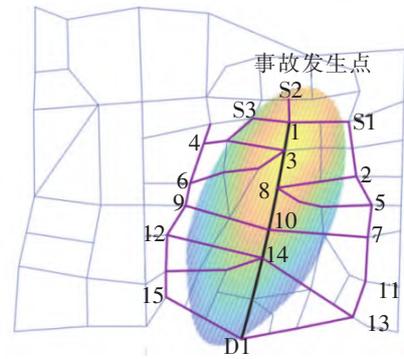


图 1 疏散应急网络

表 3 疏散网络数据

路段	$A_{S11}$	$A_{S31}$	$A_{S12}$	$A_{13}$	$A_{S34}$	$A_{1215}$
距离/km	0.4	0.2	0.8	0.5	0.2	1
路段	$A_{25}$	$A_{23}$	$A_{43}$	$A_{46}$	$A_{35}$	$A_{1014}$
距离/km	1	0.7	0.6	1	0.7	0.9
路段	$A_{38}$	$A_{36}$	$A_{57}$	$A_{78}$	$A_{710}$	$A_{15D1}$
距离/km	8	9	10	1	3	0.6
路段	$A_{810}$	$A_{69}$	$A_{910}$	$A_{912}$	$A_{711}$	$A_{13D1}$
距离/km	3	10	4	12	11	0.7
路段	$A_{912}$	$A_{1113}$	$A_{1413}$	$A_{1412}$	$A_{1415}$	
距离/km	1.2	0.5	0.5	0.1	0.7	

有毒气体主要通过鼻腔被疏散人群吸入。计算时以大众平均身高为基准, 考虑乘坐小汽车时人员高度及车辆底盘高度, 故在模拟氯气浓度分布时将人员采样高度定为 1.4 m, 即在高斯模型中,  $z = 1.4 \text{ m}$ , 疏散的车辆总数为 678 辆。

除了道路的通行能力会受到突发事件影响外, 道路的通行速度也会受到事故扩散的影响, 在本案例事故中, 不同位置的影响程度根据路径节点的位置决定。取路段两端点的加权平均值作为路段风险值, 并与各个疏散对象在路网中的通行速度相结合, 分别求解出 19 条最短时间路线与最小风险路线。最小风险路径如表 4 所示。

表 4 最小风险路径

序号	疏散路线	风险	序号	疏散路线	风险
1	S1-1-3-5-7-10-14-15-D1	45	11	S3-1-3-5-13-11-13-D1	47
2	S1-2-5-7-10-14-15-D1	47	12	S3-4-3-5-7-11-13-D1	48
3	S3-1-3-5-7-10-14-15-D1	43	13	S1-1-3-5-7-10-14-D1	49
4	S3-4-3-5-7-10-14-15-D1	48	14	S1-2-5-7-10-14-D1	51
5	S3-4-6-9-12-15-D1	48	15	S3-4-2-3-7-14-D1	46
6	S1-1-3-8-10-14-15-D1	42	16	S3-4-3-5-7-10-14-D1	47
7	S3-1-3-8-10-14-15-D1	40	17	S1-1-3-8-10-14-D1	39
8	S3-1-3-8-10-14-15-D1	36	18	S3-4-3-8-10-14-D1	38
9	S1-1-3-5-7-11-13-D1	49	19	S3-1-3-8-10-11-D1	37
10	S1-2-5-7-15-13-D1	51			

### 3.3 最优结果分析

按照线性加权法,将最短时间路径与最小风险路径采用 Lingo 求解出优化疏散策略。结果显示,在同时关注时间效率与潜在风险的疏散方案中,678 辆待疏散的车辆被合理地分配至 16 条不同的路线上,相应的多目标疏散方案见表 5。

表 5 多目标最优疏散方案

序号	疏散路线	路线时间/min	路线风险	序号	疏散路线	路线时间/min	路线风险
1	S1-1-3-5-7-10-14-13-D1	60	50	9	S1-1-3-5-7-11-13-D1	59	49
2	S1-2-5-7-10-14-13-D1	63	52	10	S1-2-5-7-11-13-D1	61	51
3	S3-1-3-5-7-10-14-13-D1	58	48	11	S3-1-3-5-7-11-13-D1	57	47
4	S3-4-3-5-7-10-14-13-D1	59	49	12	S3-4-3-5-7-11-13-D1	58	48
5	S3-4-6-9-10-14-13-D1	59	47	13	S3-4-6-9-12-14-D1	60	47
6	S1-1-3-8-10-14-13-D1	60	41	14	S1-1-3-5-7-10-14-D1	58	48
7	S3-1-3-8-10-14-13-D1	47	39	15	S1-2-5-7-10-14-D1	52	50
8	S3-4-3-8-10-14-13-D1	48	40	16	S3-1-3-5-7-10-14-D1	62	46

最终求解的目标函数值为 165.12,即综合考虑最短时间和最小风险为目标,评价函数的路径阻抗最小可达到 165.12。从结果可以看出,在同时考虑风险和疏散时间的情况下,当时间权重设定为 0.4,风险权重设定为 0.6,并且在道路通行能力固定的条件下,车辆的行驶速度将随着道路上车辆数量的增加而减慢。在应急疏散的情境下,单纯追求最短时间或最小风险的路线并不明智,也不是解决问题的理想方案。更为适宜的方法是在确保交通流畅的同时,采取一种平衡策略,挑选在风险和距离上均相对较小的道路。

### 3.4 灵敏度分析

为了进一步研究疏散时间和风险对目标函数值的影响,对所赋权重进行灵敏度分析,观察对目标函数值及疏散方案的影响,灵敏度变化如图 2 所示。

由权重灵敏度对比可以看出,随着所赋时间权重的增加,目标函数值先减小后增大,总时间呈逐渐减少趋势,总风险呈增加趋势。同时发现,权重在 0.4~0.6 之间目标函数值相对稳定,总时间和总风险在权重为 0.6 时,达到相对平衡水平,因此,在 0.4~0.6 权重范围内,总时间和总风险的变化幅度较小,且权重增加到 0.6 之后,对风险的影响较大,应较多考虑风险因素,说明本文将风险权重设定为 0.6 比较合理。

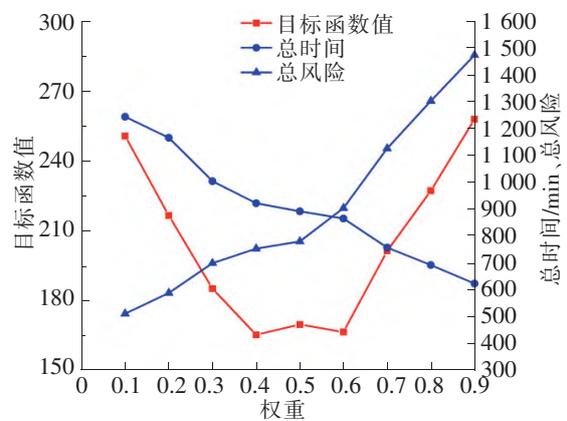


图 2 权重灵敏度

## 4 结论

(1) 针对现有应急疏散模型在疏散目标处理上的不全面问题,建立了多目标优化下的应急疏散模型,经验证具有可行性,总目标函数值为 165.12,最小风险降低了 99,可以在降低风险的同时保证时间最佳,综合提高了应急疏散的效率。

(2) 通过灵敏度分析,将风险权重设定为 0.6 时可以使双目标效果最佳、总目标函数值最小,同时符合实际疏散的需要。在实际疏散过程中,需要考虑的目标还有很多,同样可以基于不同目标的紧迫性,分配优先权重,并通过评估各个疏散计划在这些目标上的情况,确定出最优的策略。

(3) 本文假设事故影响范围及疏散人群所在区域已知,但在实际中较难及时确定,会对结果产生一定

影响;同时,假定所有疏散人群都是通过车辆来完成疏散工作的,无组织的人群行为以及人群之间相互影响对整个疏散工作有一定影响,仍有待在未来进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1]袁媛,汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 系统仿真学报,2008,20(6):1563-1566.
- [2]CAMPOS V B G, SILVA P A L D, NETTO P O B. Evacuation transportation planning: A method of identifying optimal independent routes[J]. Urban Transport V, 2000,3: 555-564.
- [3]COVA T J, JOHNSON J P. A network flow model for lane-based evacuation routing[J]. Transportation Research Part A,2003,37(7):579-604.
- [4]郑长江,卢为杰. 城市交通紧急疏散路径优化[J]. 大连交通大学学报,2011,32(4):24-27.
- [5]赵振亚,董星奎. 基于微粒群算法的最小风险路径应急物资调度问题研究[J]. 大连交通大学学报,2019,40(5):13-17.
- [6]孙克,刘刚. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 测绘,2022,45(1):3-7.
- [7]刘家林,贾斌,刘正,等. 多模式疏散交通车队配置与车道分配协同优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2022,22(4):176-185.
- [8]雷斌,寻天祥,郝亚睿,等. 城市轨道交通突发事件下换乘站应急疏散路径优化研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(5):186-194.
- [9]吴开信,王绍仁. 基于双层规划模型的车辆疏散策略研究[J]. 交通科技与经济,2015,17(2):5-10.
- [10]安实,冯德健,王健,等. 多车型多行程需求可拆分的应急疏散车辆调度[J]. 大连交通大学学报,2019,40(1):1-6.
- [11]赵书奇,张琳. 基于社会力模型的公共场所疏散仿真研究[J]. 华北科技学院学报,2024,21(1):67-75.
- [12]GIBEOM K, GYUNYOUNG H. Agent-based radiological emergency evacuation simulation modeling considering mitigation infrastructures[J]. Reliability Engineering and System Safety,2023,233:98-109.
- [13]SUN Yujie, YUAN Tengfei, CHAI Xiang, et al. Emergency evacuation time model of nuclear power plant pedestrians[J]. Progress in Nuclear Energy,2023,157:565-576.

## Multi-objective Optimization of Vehicle Path Problems Under Emergency Evacuation Conditions

GUO Ruijun, LIU Yue, DOU Yulin, LIU Yingying

(School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In recent years, the frequent occurrence of catastrophic emergencies in China and abroad has made it necessary to formulate a scientific and reasonable emergency evacuation plan in advance, and the emergency evacuation route is an important part of the emergency plan. Firstly, an evacuation model under the framework of multi-objective optimization was constructed, which aimed to complete the evacuation in the shortest time and minimal risk. Then, weights were assigned to the two objectives by means of a linear weighting method, and the multi-objective was converted into a single objective and solved by Lingo software under the premise of considering the capacity of the evacuation road network. Finally, an example simulation was carried out for the gas leakage event. The results show that the target value of risk and time is 165.12, which reduced by 99 comparing to only considering the minimum risk. Comparing with the traditional single-factor considerations, it is a relatively better strategy to prioritize the path with smaller risk and time, which can comprehensively improve the efficiency of emergency evacuation and provide optimal solution for the development and rehearsal of the emergency evacuation plan in the future.

**Key words:** emergency evacuation; path optimization; multi-objective model; linear weighting method; Lingo