

基于AHP-熵权法的城市道路塌陷风险评估研究

胡亚年^{1,3}, 郝国才^{2,3}, 柴攀攀^{2,3}, 王保^{1,3}, 王鑫雨^{1,3}

[1. 江苏城市联创安全技术研究院有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 苏交科集团(江苏)安全科学研究院有限公司, 江苏 南京 210000; 3. 江苏省城市安全技术研究院, 江苏 南京 210000]

摘要: 为客观评估城市道路塌陷隐患风险,以江苏省城市生命线安全工程为背景,基于《江苏省城市道路塌陷风险评估技术指南(试行)》提出的指标体系,依据地区实际情况对指标进行优化,建立了城市道路塌陷风险评估指标体系,并采用AHP-熵权法优化权重,对A市的15条道路开展了风险评估,同时利用道路空洞探测的结果对评估结果进行验证,结果表明:有5条道路为较大风险,10条道路为一般风险,15条道路下方均有不同程度的病害,其中2条较大风险的道路下方存在脱空和空洞病害。风险评估的结果与道路空洞探测结果的吻合度较高,优化后的评估指标在城市道路塌陷风险评估方面具有一定的应用价值,研究工作可为城市生命线道路塌陷隐患风险防控提供技术支持,也可为同类灾害评估提供参考。

关键词: 城市生命线;道路塌陷;风险评估;AHP-熵权法;指标体系

中图分类号: TU997;U418.5;X913.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0001-05

Research on Urban Road Collapse Risk Assessment Based on AHP-Entropy Weight Method

HU Yanian^{1,3}, HAO Guocai^{2,3}, CHAI Panpan^{2,3}, WANG Bao^{1,3}, WANG Xinyu^{1,3}

[1. Jiangsu Urban Lianchuang Safety Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. JSTI Group (Jiangsu) Safety Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. Jiangsu Urban Safety Technology Research Institute, Nanjing 210000, China]

Abstract: To objectively assess the risk of urban road collapse, based on the Jiangsu Province Urban Lifeline Safety Project, according to the index system proposed in the "Guide" and relying on the actual situation of the region, the indexes are optimized, and an urban road collapse risk assessment index system is established. The AHP-entropy weight method is used to optimize the weights, and the risk assessment is conducted on 15 roads in City A. At the same time, the assessment results are verified by using the results of road void detection. The results show that 5 roads are at high risk and 10 roads are at general risk. There are the varying degrees of diseases beneath 15 roads, in which there are voids and hollow diseases beneath two roads with relatively high risks. The results of the risk assessment are in high agreement with the results of road void detection. The optimized assessment indicators have certain application value for urban road collapse risk assessment. The research work can provide technical support for the prevention and control of urban lifeline road collapse risks and also provide a reference for similar disaster assessments.

Keywords: urban lifeline; road collapse; risk assessment; AHP-entropy weight method; indicator system

0 引言

在中国城市化快速推进的背景下,道路塌陷事故频繁发生,其诱因复杂多样,主要包括地下管线老化破损引发水土流失、地下工程施工扰动、道路长期超载运行以及极端强降雨的冲刷作用等。道路不仅是城市交通载体,其下方还密集分布着供水、排水、燃气、电力、通信等,各类管线共同构成了城市运行

的“动脉”与“神经”网络^[1-2],一旦发生塌陷,不仅会直接中断交通,更可能引发连锁反应,如地下管线破裂导致燃气泄漏、供水中断、通讯受阻等,进而可能造成城市生命线系统局部甚至区域性的功能障碍,严重影响城市安全和公共安全。

对于道路塌陷风险评估,基本思路是构建风险评估指标体系,确定不同决策变量的权重,根据权重计算风险分值^[3]。传统道路塌陷风险评估采用的层次分析法主观性强,因此部分学者在此基础上加入了云模型、三角模糊数、博弈论等模型,优化了评估方法^[4-5]。有学者利用风险控制理论^[6-7],通过建立评

收稿日期: 2025-12-16

作者简介: 胡亚年(1996—),男,硕士,工程师,从事城市安全研究工作。

估指标体系评估城市道路塌陷的风险,并用实际案例验证了结论的准确性,为城市道路塌陷防控提供技术支撑。顾小建等^[8]建立了博弈论-云模型的城市道路塌陷分项评价体系,对主客观权重进行了优化,解决了权重分配合理性不足的问题,为城市道路塌陷风险动态评估提供了可靠工具。

而《江苏省城市道路塌陷风险评估技术指南(试行)》^[9](以下简称《指南》)作为指导性文件,部分指标与城市的实际情况不符,且权重计算的主观性较强,因此本文基于江苏省A市城市生命线安全工程道路专项的实际情况,通过风险辨识和分析,优化部分指标,构建评估指标体系,利用AHP-熵权法优化权重计算,对A市部分道路开展了风险评估。评估结论可有效地实现道路塌陷风险源的辨识并落实安全风险管控措施,为城市道路塌陷风险评估提供参考。

1 评估方法

1.1 风险识别

城市道路塌陷包括因自然条件导致的塌陷和人为因素导致的塌陷,其风险成因主要包括地质环境条件、降雨量、地下管线、载荷与振动等因素^[10-11]。道路下方的土壤类型、该地区的降雨量情况、地下给排水管线的材质及服役年限、管道是否存在泄漏、道路是否允许重车通行及涉路施工等因素,都是导致道路塌陷隐患的潜在因素。

1.2 指标体系建立

通过对A市道路实际情况的调研,结合《指南》中给出的参考指标,建立了符合A市道路实际情况的指标体系,分为可能性指标、后果指标及管理因素指标,各指标的分值区间为0~10分,指标分级标准结合专家意见与现场实际划定,如表1和表2所示。

其中,日常管理能力 P_7 通过日常管理体系、制度建设、资金投入、巡查养护等内容综合判断;应急管理能力 C_7 通过应急设施设备情况、预案编制及应急队伍建设情况,应急响应能力综合判断。

1.3 权重计算

层次分析法在计算权重时,其核心是依赖决策者的主观判断将定性比较转化为定量数据,会导致权重产生偏差,缺乏客观稳定性^[12-13]。

熵权法是一种用于多对象、多指标的综合评价方法,可以通过对数据的标准化处理,获得较好的客观指标权重^[14-15]。

表1 可能性指标P

分类	评估指标	分级	分值
地质环境 条件 P_1	地质环境 条件 P_1	松散填土、粉土和砂土;软土	9~10
		中密填土、粉土和砂土;松散卵(碎)砾石;黏性土	7~9
		密实填土、粉土和砂土	5~7
		中密~密实碎石土	2~5
	年降雨量 P_2	>1 200 mm	9~10
可能性 指标 P	管线材质 P_3	1 000~1 200 mm	8~9
		800~1 000 mm	7~8
		<800 mm	6~7
		混凝土、砌体方沟、石棉水泥、陶罐等易损材质	9~10
	管道服役 年限 P_4	塑料等强度较小材料	7~9
		铸铁等可靠性较低材料	5~7
		钢管等可靠性较高材料	2~5
		>20年	9~10
	管线现有 缺陷 P_5	10~20年	7~9
		5~10年	5~7
		<5年	2~5
		4级缺陷占比超过90%;管线存在大量缺陷未修复,带病运行	7~10
施工扰动 P_6	施工扰动 P_6	4级缺陷占比30%~90%;管线缺陷较多,修复后管段状况正常	3~7
		4级缺陷占比10%~30%;管线缺陷基本修复,总体运行良好	1~3
		4级缺陷占比小于10%;管线缺陷完全修复,总体状况完好	0~1
		道路曾涉及地下轨道施工或正在施工	9~10
	日常管理 能力 P_7	深基坑施工	7~9
		顶管施工	5~7
		其他	2~5
		D级	8~10
	日常管理 能力 P_7	C级	6~8
		B级	4~6
		A级	0~4

本文通过上述两种方法得到权重并按照式(1)进行耦合,来降低层次分析法主观权重对评估结果的影响。

$$Wx=\lambda Wx'+(1-\lambda)Wx'' \tag{1}$$

式中: λ 为权重比值; Wx' 为主观权重; Wx'' 为客观权重; Wx 为综合权重。

1.4 风险计算

根据建立的指标体系及通过调研、论证所得出的取值,分别对可能性 P 和后果 C 进行计算,计算公式为式(2)、式(3)。

$$P=\sum_{i=1}^n Wx_i P_i \tag{2}$$

表2 后果指标 C

分类	评估指标	分级	分值
人员密集程度 C_1	周边 100 m 有大型商场、体育场、演出场所、大型广场、学校等重要公共建筑物或人员聚集场所或周边 50 m 内有公交车站、地铁站等或所在道路车流、人流量大	7~10	
	周边 100 m 有中小型商场(超市)、办公场所、居民楼等人员较多的场所	5~7	
	其他	2~5	
财产密度 C_2	周边 100 m 有金融机构(含银行)、大型商场、企业总部、危险化学品设施等财产密集或危险性极大的场所	8~10	
	不属于上述情况,但周边 100 m 有中小型商场(超市)、居民楼、办公场所、危险性较高设施等财产密度较高的场所	6~8	
	不属于上述 2 种情况,但周边 100 m 有民房危险性较低设施等财产密度较少	3~6	
	周边 100 m 有较少的财产	1~3	
社会影响 C_3	周边 200 m 范围内有重要场所,包括但不限于下列情况:国家、省市级标志性建筑;领事馆;国家党政军重要办公场所;著名景点、商场等标志性场所	8~10	
	周边 200~500 m 范围内有重要场所,包括但不限于下列情况:国家、省市级标志性建筑;领事馆;国家党政军重要办公场所;著名景点、商场等标志性场所	6~8	
	其他情况	3~6	
设施易损性 C_4	按照道路范围内管线复杂程度进行综合判断,包括燃气、供水、排水管线等,其中燃气占比 50%,供水管线 25%,雨水管线 12.5%、污水管线 12.5%	0~10	
道路现状 C_5	路面存在明显变形、沉陷等	8~10	
	路面存在明显裂缝、坑槽等	5~8	
	路面龟裂、轻微变形	0~5	
	路面完好	0	
道路易损性 C_6	近 5 年评估单元道路内发生 5 次以上塌陷	8~10	
	近 5 年评估单元道路内发生 3~5 次塌陷	6~8	
	近 5 年评估单元道路内发生 1~2 次塌陷	3~6	
	近 5 年评估单元道路内未发生塌陷	1~3	
应急管理 能力 C_7	D 级	8~10	
	C 级	6~8	
	B 级	4~6	
	A 级	0~4	

$$C = \sum_{j=1}^n W_{x_j} C_j \tag{3}$$

式中: P 为可能性得分; P_i 为第*i*项指标的取值; W_{x_i} 为第*i*项指标权重; C 为后果得分; C_j 为第*j*项指标的取值; W_{x_j} 为第*j*项指标权重。

1.5 风险等级划分及一致性验证

本文邀请城市生命线专家库内 5 位道路安全、养护与管理领域的专家,综合考虑道路塌陷的可能性及后果严重程度(见表 5),采用德尔菲法开展多轮意

见征询,通过肯德尔和谐系数进行一致性验证,因不同专家针对不同情况给出了相同的等级,因此采用式(4)、式(5)来计算肯德尔和谐系数^[16]。计算得知 $W=0.82$,表明 5 位专家对风险等级的判定具有高度一致性,即表 6 所示的风险等级划分是可靠的。

$$W = \frac{12S}{K^2(N^3 - N) - K \sum_{j=1}^K T_j^2} \tag{4}$$

$$S = \sum_{i=1}^N (R_i - R_j)^2 \tag{5}$$

式中: W 为肯德尔和谐系数,值域为 $[0, 1]$, W 越接近 1,表示一致性越高,越接近 0,表示一致性越差^[16]; S 为每个被评定对象的等级和 R_i 与所有等级和的总平均值 R_j 的离差平方和; R_i 为第*i*个被评定对象从所有评定者处获得的等级之和; R_j 为所有 R_i 的算术平均值; K 为评定者的人数,即专家数; N 为被评定对象的个数。

表5 可能性与后果等级划分

级别	对应分值	可能性等级划分说明	后果性等级划分说明
1 级	[0, 2)	可能性极低	后果严重程度极低
2 级	[2, 4)	可能性较低	后果严重程度较低
3 级	[4, 6)	可能性一般	后果严重程度一般
4 级	[6, 8)	可能性较高	后果严重程度较高
5 级	[8, 10)	可能性极高	后果严重程度极高

表6 风险等级划分

后果等级						
可能性等级	5	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
	4	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
	3	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	2	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
	1	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
	1	2	3	4	5	

表 6 中,Ⅰ级为低风险、Ⅱ级为一般风险、Ⅲ级为较大风险、Ⅳ级为重大风险。

2 实例分析

2.1 道路概况

根据江苏省 A 市城市道路的道路等级(主干路、次干路、支路)、不同的地质条件、不同地下管线的特征及是否开展了道路空洞探测,选取了 15 条城市道路对评估结果进行分析和验证,各道路的基本情况如表 7 所示。

通过表 7 得知,部分道路下方土壤类型为软土,稳定性差、易沉降^[17],道路下方敷设有雨水、污水、供水管线,其中雨水、污水管线的材质为混凝土和

表7 评估单元基本情况

评估单元名称	评估单元起点	评估单元终点	评估单元长度/m	地质土壤类型	管线材质
甬江路	虞山北路	南沙路	1 218	软土	混凝土、PVC、塑料
虞山北路	环城北路	三环路	4 021	软土	混凝土、PVC、钢管
绿山路	黄河路	三环路	420	软土	混凝土、PVC、钢管
枫林路	虞山北路	昭文路	2 600	软土	混凝土、PVC、灰口铸铁
青墩塘路	海虞南路	三环路	3 865	软土	混凝土、HDPE、钢管
小坝路	甸桥西路	山湖路	730	密实填土、粉土、砂土	混凝土、HDPE实壁管
昭文路	海虞北路	三环路	3 631	软土	混凝土、砖石、PVC、钢
富春江西路	新世纪大道	三环路	2 986	软土	混凝土、PVC、HDPE实壁管
陶山路	富春江西路	漕湖路	950	软土	混凝土、PVC、球墨铸铁
新颜路	海虞南路	新世纪大道	1 528	软土	混凝土、PVC、UPVC
龙腾路	景龙路	琴川大道	620	软土	塑料、钢管
张坝路	报慈北路	南沙路	830	密实填土、粉土、砂土	混凝土、PVC、塑料
书院街	环城南路	引线街	920	软土	混凝土、PVC、砖、钢
中欣街	文华街	北门大街	100	密实填土、粉土、砂土	混凝土、PVC
金茂路	江南大道	永嘉路	610	软土	混凝土、PVC

PVC,供水管线的材质为钢管、球墨铸铁、灰口铸铁。混凝土为易损材质,在污水等环境下易腐蚀穿孔,使管体强度降低;PVC为强度较小的材质,易受外力影响而破裂或变形;钢管则易受外界环境和温度的影响,产生裂纹。

结合A市的相关规划文件及日常养护管理文件可知,A市2024年的年平均降雨量为1 056.55 mm,对道路下方的雨污水管线开展CCTV检测,无3级、4级缺陷,其余缺陷已基本修复;A市道路主管部门已编制道路塌陷的应急预案及相关养护制度,但无相关的日常巡查记录,应急物资无具体统计数据。

2.2 权重计算及验证

按照1.3节内容分别计算 $W_{x'}$ 和 $W_{x''}$,利用公式(1)计算综合权重(取小数点后4位),其中 λ 由专家综合考虑赋值,本文中 λ 取值0.55。表8、表9为各指标权重的计算结果。

表8 可能性指标重计算结果

P	$W_{x'}$	$W_{x''}$	W_x
P_1	0.130 1	0.150 3	0.139 2
P_2	0.105 7	0.000 0	0.058 1
P_3	0.057 0	0.062 5	0.059 4
P_4	0.069 6	0.070 1	0.069 8
P_5	0.295 5	0.154 3	0.232 0
P_6	0.309 4	0.296 3	0.303 5
P_7	0.032 8	0.266 5	0.138 0

为了验证权重比值 λ 对所建立评估模型的敏感性,验证评估结果的稳定性,本文进行了灵敏度分析。令 λ 值在0.3~0.7(间隔0.1)变化,分别计算15条道路在不同 λ 值下的综合风险得分,并依据表5判定

表9 后果指标权重计算结果

C	$W_{x'}$	$W_{x''}$	W_x
C_1	0.165 5	0.158 3	0.162 3
C_2	0.035 0	0.088 1	0.058 9
C_3	0.037 4	0.102 5	0.066 7
C_4	0.103 2	0.121 7	0.111 5
C_5	0.173 5	0.169 8	0.171 8
C_6	0.411 7	0.245 1	0.336 7
C_7	0.073 7	0.114 5	0.092 1

其风险等级。分析结果如表10所示。

表10 不同 λ 值的道路风险等级变化

评估单元名称	λ 值					
	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.7
甬江路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
虞山北路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
绿山路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
枫林路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
青墩塘路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
小坝路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
昭文路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
富春江西路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
陶山路	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ
新颜路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
龙腾路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
张坝路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
书院街	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
中欣街	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
金茂路	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

从表10可以看出, λ 值取0.3、0.4、0.7时,部分道路的风险等级会发生变化,但 λ 值在[0.5,0.6]区间内变化时,15条道路的风险等级保持完全稳定,表明本文所建立的评估模型在 $\lambda=0.55$ 附近有较好的稳健

性,评估结果对 λ 的具体取值不敏感,进一步验证了评估结果的准确性。

2.3 评估结果及验证

评估结果显示,有 5 条道路为较大风险,10 条为一般风险,造成风险为较大风险的原因包括以下 4 点。

(1)道路下方的土壤类型为软土,易发生地面沉降。

(2)年平均降雨量为 1 056.55 mm,降雨量较大,雨水渗入路面基层和路基后,会软化土体,导致承载力下降。

(3)道路下方的管线密集,包括雨水、污水、供水、燃气等管线,管线材质以混凝土、PVC 等易损材质和强度较小的材质为主,易发生破损破裂,导致泄漏,造成地下水土流失,土壤承载力下降。

(4)日常管理能力不足,不能及时发现道路病害并处置。

通过开展相应的道路空洞探测,这 15 条道路下方均有不同程度的病害,其中绿山路、陶山路 2 个较大风险路段下方存在脱空、空洞病害,病害较为严重,具体结果如表 11 所示。

表 11 评估结果与探测结果

评估单元 名称	评估结果			探测 结果
	可能性得分	后果得分	风险等级	
甬江路	4.211	3.913	一般风险	疏松体
虞山北路	4.211	4.247	较大风险	疏松体
绿山路	4.281	4.249	较大风险	脱空
枫林路	4.281	3.741	一般风险	疏松体
青墩塘路	5.279	4.256	较大风险	疏松体
小坝路	3.724	3.123	一般风险	疏松体
昭文路	4.141	3.569	一般风险	疏松体
富春江西路	4.351	4.860	较大风险	疏松体
陶山路	4.211	4.097	较大风险	空洞
新颜路	4.281	3.741	一般风险	疏松体
龙腾路	4.022	3.741	一般风险	疏松体
张坝路	3.724	3.295	一般风险	疏松体
书院街	4.141	3.569	一般风险	疏松体
中欣街	3.724	2.951	一般风险	疏松体
金茂路	3.793	3.467	一般风险	疏松体

3 结 语

文章基于《指南》优化了城市道路塌陷风险评估指标体系,利用 AHP-熵权法优化了权重,并对 A 市

道路进行了评估,并与道路空洞探测的结果进行对比,验证了评估结果的准确性。

优化对《指南》中的指标体系,从可能性与后果 2 个维度共 14 个指标进行了细致地阐述,可为城市道路塌陷风险评估提供参考。

本文建立的指标体系主观性较强,后续随着城市生命线工程的推进及数据的完善,可尝试采用机器学习或深度学习等方法,借助人道 CCTV 检测数据、地质雷达数据、环境传感数据等与道路塌陷的关系,构建完全由数据驱动的预测模型,逐步减少对专家经验的依赖。

参考文献:

[1] 袁宏永,章翔,黄丽达,等.城市生命线安全工程关键技术研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1251-1263.

[2] 肖菁雯,李知健,余健俊.中国城市生命线安全治理研究综述[J].中国安全生产科学技术,2025,21(7):54-61.

[3] 周子勇,石浩宇,董毓良,等.基于层次熵权-云模型城市道路塌陷风险评价研究[J].安全与环境学报,2023,23(6):1752-1761.

[4] 周磊,竺启泽,鞠建荣,等.基于组合赋权的城市道路塌陷易发性评估研究[J].城市勘测,2025(4):216-222.

[5] 王一兆,柏文锋,何青伦,等.基于数据增强的道路塌陷风险评估方法[J].中国安全科学学报,2025,35(增刊1):234-238.

[6] 许晓莹,陈斌.城市道路空洞隐患风险评估方法应用研究[J].市政技术,2021,39(增刊1):149-154;172.

[7] 王晓辉,陆丹.城市道路塌陷总体风险评估方法研究[J].黑龙江科学,2024,15(24):29-33.

[8] 顾小建,侯兆军,方亮文,等.基于博弈论-云模型的城市道路塌陷风险评价[J].交通科学与工程,2026(2):33-41.

[9] 江苏省住房和城乡建设厅.《江苏省城市道路塌陷风险评估技术指南(试行)》[Z].南京:江苏省住房和城乡建设厅,2021年.

[10] 谢小国,张伟,罗兵,等.成都市城市道路塌陷成因及快速探测方法[J].中国地质调查,2022,9(4):112-120.

[11] 刘乃钰,谢昭瑞,张晓田,等.我国城市道路塌陷治理领域管理政策现状分析及思考[J].工程建设标准化,2023(7):72-78.

[12] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.

[13] 王哲.基于模糊层次分析法的桥梁技术状况评估[J].交通科技,2016(5):68-71.

[14] 聂钰明,李屹东,刘群芳,等.基于 AHP-熵权法的液氨储罐安全评价[J].工业安全与环保,2024,50(2):36-39;44.

[15] 北京灵智时代科技有限公司.一种城市公共安全特征指数计算方法:中国,202510157971.5[P].2025-06-03.

[16] 刘艳锋.肯德尔和谐系数的实际运用[J].河南机电高等专科学校学报,2006(1):41-42.

[17] 吴佳捷.位于软基上的道路施工方法研究[J].交通科技,2025(3):71-74.