

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250422001

文章编号:1674-599X(2026)02-0033-09

引用格式: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,2026,42(2):33-41.

Citation: GU Xiaojian, HOU Zhaojun, FANG Liangwen, et al. Risk evaluation of urban road collapse based on game theory-cloud model[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 33-41.

基于博弈论-云模型的城市道路塌陷风险评价

顾小建¹,侯兆军^{1,2},方亮文²,丁珣昊³

(1.苏州市市政管理中心,江苏 苏州 215002;2.悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司,江苏 苏州 215123;
3.东南大学 交通学院,江苏 南京 211189)

摘要:【目的】解决道路塌陷风险评价中主客观权重分配合理性不足、风险不确定及表征困难的问题,建立科学可靠的风险评价模型,为道路塌陷防治提供技术支持。【方法】从涉水管线、施工活动、自然环境和道路状态4个维度选取11项指标构建评价体系。采用主观赋权法(G1法)和客观赋权法(EW法)分别计算主客观权重,基于博弈论原理进行组合优化;结合云模型量化风险随机性与模糊性,通过期望值比对实现风险等级判定。【结果】以工程实例为背景,经对比分析发现:博弈论组合赋权较传统加法合成法指标间重要性差异程度显著强化,较乘法归一小指标偏差问题明显改善;4个评价单元风险等级分别为I级(低风险)、II级(中风险)、III级(高风险)、IV级(极高风险),评价单元的风险等级与探地雷达探明的地下病害体的分布、风险等级吻合度较高,评价准确率为77.8%。【结论】博弈论组合赋权有效平衡了G1法的主观经验局限与EW法的数据依赖缺陷,避开了传统组合赋权法的弊端,云模型通过期望值、熵、超熵三重参数客观表征风险边界,该方法可为城市道路塌陷风险动态评估提供可靠工具。

关键词:道路工程;道路塌陷;风险评价;博弈论;组合赋权;云模型

中图分类号:U492.8

文献标志码:A

Risk evaluation of urban road collapse based on game theory-cloud model

GU Xiaojian¹, HOU Zhaojun^{1,2}, FANG Liangwen², DING Xunhao³

(1.Suzhou Municipal Administration Center, Suzhou 215002, China; 2.Xidi (Suzhou) Investigation and Design Consulting Co., Ltd., Suzhou 215123, China; Southeast University Transportation School, Nanjing 211189, China)

Abstract: [Purposes] To address the issues of insufficient rationality in the allocation of subjective and objective weights, risk uncertainty, and difficulties in risk characterization in road collapse risk assessment, this study aims to establish a scientific and reliable risk assessment model to provide technical support for road collapse prevention and control. [Methods] An evaluation system was constructed by selecting 11 indicators from four dimensions: water-related pipelines, construction activities, natural environment, and road conditions. Subjective weighting method (G1 method) and objective weighting method (EW method) were employed to calculate subjective and objective weights respectively, which were then combined and optimized based on game theory principles. The cloud model was utilized to quantify the randomness and fuzziness of risks, and risk levels were determined through expectation value comparison. [Findings] Against the backdrop of an engineering case, comparative analysis revealed that the game theory-based combined weighting significantly enhanced

收稿日期:2025-04-22

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1600102)

通信作者:侯兆军(1989—),男,高级工程师,主要从事城市生命线安全监测方面的研究工作。E-mail:houszj@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

the differences in importance among indicators compared to the traditional additive synthesis method, and markedly improved the deviation issues of minor indicators compared to the multiplicative normalization method. The risk levels of the four evaluation units were classified as Level I (low risk), Level II (medium risk), Level III (high risk), and Level IV (extremely high risk), respectively. The risk levels of the evaluation units exhibited a high degree of agreement with the distribution and risk levels of underground defects detected by ground-penetrating radar, with an evaluation accuracy rate of 77.8%. [Conclusions] The game theory-based combined weighting effectively balances the subjective experience limitations of the G1 method and the data dependency flaws of the EW method, avoiding the drawbacks of traditional combined weighting methods. The cloud model objectively characterizes risk boundaries through three parameters: expectation value, entropy, and hyper-entropy. This method can serve as a reliable tool for dynamic assessment of urban road collapse risks.

Key words: road engineering; road collapse; risk evaluation; game theory; combination weighting; cloud model

近年来,全国道路塌陷事故频发,这不仅会导致交通中断、车辆受损,还可能引发人员伤亡等重大事故,造成极大的经济损失和社会影响。城市道路塌陷具有群发性、复发性、突发性、地域性和隐蔽性的特点,具有点多面广分布、地域分布及季节性分布等特征^[1]。《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》(JGJ/T 437—2018)将地下病害体分为脱空、空洞、疏松体和富水体4类,是产生道路塌陷的重要因素。准确评价道路塌陷的风险,对于预防塌陷事故的发生,保障道路的安全运行具有重要的意义。

在道路塌陷风险评价领域,主观赋权法具备层次分析法系统性强、所需定量数据信息较少等优点,客观赋权法中熵权法具备客观性强、对数据变化较敏感等优点,在道路塌陷风险评价领域应用较广泛。叶远春等^[2]运用模糊层次分析法建立了城市道路空洞安全的风险评估方法。魏会龙等^[3]采用层次分析法开展深圳市地面坍塌危险性分区评价。刘文^[4]建立城市道路地面塌陷评估指标集及熵权法计算模型。师文豪等^[5]提出基于地质雷达探测和熵权二维云模型的城市道路塌陷风险评价方法。但由于层次分析法受主观因素影响大、高度依赖经验判断,熵权法缺乏对指标内涵的考量、数据依赖性高,陈希等^[6]、周子勇等^[7]、余满仓等^[8]学者权衡主客观赋权法的优劣势,将层次分析法和熵权法相结合,并通过加法合成或乘法归一等方法得到组合权重,合理确定了风险等级。

本文针对层次分析法在指标数量较多或模糊性较强时判断矩阵容易出现不一致的情况,引入王

学军^[9]提出的无需一致性检验的G1法改进主观赋权过程,并基于博弈论思想优化主客观权重分配,通过极小化权重离差实现科学组合赋权。同时,利用云模型处理评价指标的随机性和模糊性,构建包含涉水管线因素、施工因素、自然因素和道路因素4个维度的11项指标评价体系。基于某市人民路重要区段的工程实例,结合探地雷达探测结果证实了该方法的适用性和准确性。

1 评价指标体系

道路塌陷的成因复杂多样,主要包括管线缺陷、地下工程施工和地质条件等人为因素和自然因素^[10]。供排水等涉水管线发生渗漏时,水流会对周边土体产生冲刷和侵蚀,导致水土流失,形成空洞并引发道路塌陷;地下工程施工不可避免地会对周边土体造成扰动,破坏土体的稳定性,极大地增加了道路塌陷风险;在软土等特殊地质区域内,软土地基的承载能力较低,在长期的车辆荷载作用下,容易发生沉降和变形,当沉降量过大时,就会引发路面塌陷。

在构建道路路面塌陷风险评估指标体系时,需遵循全面性、科学性、可操作性等原则,能够全面涵盖影响道路塌陷的相关因素,准确反映道路塌陷的风险状况。根据全国各地道路塌陷事故统计及成因分析结果^[11-13],选取涉水管线因素、施工因素、自然因素和道路因素等4个一级指标和管道缺陷、施工类型、年降雨量、交通荷载等11个二级指标,构建了道路塌陷风险评价指标体系,如图1所示。评价指标分级及取值范围见表1。

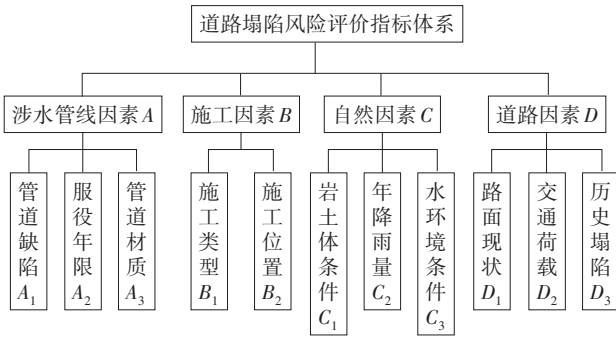


图 1 道路塌陷风险评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for road collapse risk

2 综合评价方法

在道路塌陷风险评价中,引入主观赋权法(G1法)和客观赋权法(EW法)分别计算指标权重,并将博弈论思想应用在主客观权重分配中。根据风险等级分级标准、评价指标数据,利用云模型的云发生器,分别生成标准云图和综合云图,并通过与标准云图的对比分析,实现对道路塌陷风险的定性评价。

2.1 博弈论组合赋权

2.1.1 G1法计算主观权重

G1法是通过确定指标的序关系和相邻指标的相对重要性比值来计算指标权重^[14],省去了层次分析法中构建判断矩阵和一致性检验等步骤,避免了专家在指标两两比较时因指标过多或模糊性而出现判断错误。

对于道路塌陷风险评价指标体系中同一层级的 m 个评价指标,G1法权重计算步骤如下:

1) 确定指标序关系。将评价指标按照重要性从高到低进行排序,分别记为 $A_1^*, A_2^*, \dots, A_m^*$,形成评价指标的唯一序关系: $A_1^* > A_2^* > \dots > A_{k-1}^* > A_k^* > \dots > A_m^*$ 。

2) 确定相邻指标 A_{k-1}^* 和 A_k^* 的相对重要性比值:

$$r_k = \frac{\omega_{k-1}^*}{\omega_k^*} \quad (1)$$

式中: r_k 为序关系中相邻指标 A_{k-1}^* 和 A_k^* 的权重比值,取值为 1.8、1.6、1.4、1.2、1.0,分别表示指标 A_{k-1}^* 比指标 A_k^* 极端重要、强烈重要、明显重要、稍微重要和同样重要; ω_{k-1}^* 和 ω_k^* 分别为评价指标 A_{k-1}^* 和 A_k^* 的权重, $k=n, n-1, \dots, 3, 2$ 。

3) 计算指标权重。当专家给出了相邻评价指标间的权重比值 r_k ,则评价指标 A_m^* 对应的权重 ω_m^* 为:

表 1 评价指标分级及取值范围

Table 1 Evaluation index grading and value range

评价指标	评价分级	取值范围	
涉水 管线 因素	管道 缺陷	管线 3 级以上结构性缺陷数 5 处以上	<80 ~ 100
		管线 3 级以上结构性缺陷数 3 ~ 5 处	<50 ~ 80
		管线 3 级以上结构性缺陷数 1 ~ 2 处	<20 ~ 50
		管线无 3 级以上结构性缺陷	0 ~ 20
	服役 年限	>20 年	<90 ~ 100
		10 ~ 20 年	<70 ~ 90
		5 ~ <10 年	<50 ~ 70
		<5 年	20 ~ 50
	管道 材质	混凝土、砌体方沟等易损材质	<90 ~ 100
		塑料等强度较小材料	<70 ~ 90
		铸铁等可靠性较低材料	<50 ~ 70
		钢管等可靠性较高材料	20 ~ 50
施工 因素	施工 类型	地下轨道施工	<90 ~ 100
		深基坑施工	<70 ~ 90
		顶管施工、拖拉管施工	<50 ~ 70
		其他施工活动	20 ~ 50
	施工 位置	施工场地与道路边线距离在 5 m 以内	<80 ~ 100
		施工场地与道路边线距离在 5 ~ 10 m	<50 ~ 80
		施工场地与道路边线距离在 10 m 以外	<20 ~ 50
	道路周边无施工	0 ~ 20	
自然 因素	岩土 体条件	松散填土、粉土和砂土;淤泥质土	<90 ~ 100
		中密填土、粉土和砂土;黏性土	<70 ~ 90
		密实填土、粉土和砂土	<50 ~ 70
		中密 ~ 密实碎石土	20 ~ 50
	年降 雨量	>1 200 mm	<80 ~ 100
		1 000 ~ 1 200 mm	<60 ~ 80
		800 ~ <1 000 mm	<40 ~ 60
	<800 mm	20 ~ 40	
水环 境条件	处于河流、湖泊等水体周边 30 m 范围内; 易发生严重积水	<80 ~ 100	
	排水条件一般,易发生积水	<50 ~ 80	
	排水条件较好,不易出现积水	0 ~ 50	
道路 因素	路面 现状	路面存在局部沉降、凹陷等明显变形	<80 ~ 100
		路面存在较多纵横向裂缝或坑槽等损伤 病害	<50 ~ 80
		路面病害较少	<20 ~ 50
		路面结构完好	0 ~ 20
	交通 荷载	机动车频繁、重载车辆通行区域	<70 ~ 100
		自行车道或机动车流量较少的区域	<50 ~ 70
		人行道、广场等	0 ~ 50
	历史 塌陷	评估单元内近 5 年发生 5 次以上道路塌陷	<80 ~ 100
		评估单元内近 5 年发生 3 ~ 5 次道路塌陷	<60 ~ 80
		评估单元内近 5 年发生 1 ~ 2 次道路塌陷	<30 ~ 60
评估单元内近 5 年未发生道路塌陷		10 ~ 30	

$$\omega_m^* = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_k\right)^{-1} \quad (2)$$

确定指标 A_m^* 的权重 ω_m^* 后, 指标集内其余指标的权重可通过式(2)得出:

$$\omega_{k-1}^* = r_k \times \omega_k^* \quad (3)$$

4) 确定各专家权重指数。以上决策方法只能确定单个专家决策下的指标权重, 假设共有 n 位专家参与决策, 引入熟悉程度分值 d_j , 根据专家对道路塌陷风险评估的熟悉程度分别赋值, 则第 j 位专家在赋权过程中的权重系数 L_j 为:

$$L_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (4)$$

式中: d_j 为第 j 位专家对道路塌陷领域的熟悉程度分值, 取值为 1、2、3、4, 分别表示不太熟悉、一般熟悉、比较熟悉、特别熟悉。

则第 k 个指标的最终权重为:

$$\omega_k = \sum_{j=1}^n L_j \omega_k^* \quad (5)$$

2.1.2 EW法计算客观权重

在道路塌陷风险评价中, EW法是通过计算各评价指标的熵值来衡量其信息的不确定性程度。若某一指标的熵值越小, 表明该指标的信息不确定性越小, 其提供的有效信息量越大, 在评价中应赋予较大的权重。EW法权重计算步骤如下:

1) 建立指标数值矩阵。针对不同专家对不同指标的评分分值, 形成 $n \times m$ 的评价指标数值矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。其中, b_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个评价指标打分。

2) 指标数值标准化和归一处理。

采用极差法, 对指标原始数值矩阵进行正向化和标准化处理, 得到指标数值 b_{ij} 的标准化值 b'_{ij} 为:

$$b'_{ij} = \frac{\max(b_{ij}) - b_{ij}}{\max(b_{ij}) - \min(b_{ij})} \quad (6)$$

对指标的标准化值 b'_{ij} 进行归一化处理, 得到 b^*_{ij} :

$$b^*_{ij} = \frac{b'_{ij}}{\sum_{i=1}^m b'_{ij}} \quad (7)$$

3) 计算指标熵值和权重。计算第 j 个指标的熵值 E_j 为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n b^*_{ij} \ln b^*_{ij} \quad (8)$$

计算第 j 个指标的权重 ω_j :

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (9)$$

2.1.3 博弈论组合赋权

博弈论组合权重的基本思想是针对主、客观赋权方法得到的不同权重, 寻找其一致并进行折中, 使得计算出的组合权重与主、客观权重的偏差最小。其主要计算步骤如下:

1) 确定组合权重向量。采用 L 种赋权方法确定 m 个指标的权重, 形成基本权重向量 $\omega_l = [\omega_{l1}, \omega_{l2}, \dots, \omega_{lm}] (l=1, 2, \dots, L)$ 。则 L 个权重向量集的线性组合可表示为:

$$\omega = \sum_{l=1}^L \alpha_l \omega_l^T \quad (10)$$

式中: ω 为组合权重向量; α_l 为线性组合系数, $\alpha_l > 0$; ω_l^T 为基本权重向量 ω_l 的转置矩阵。

2) 计算优化组合系数。基于博弈论组合原理, 为实现 ω 与 ω_l 的离差极小化, 优化线性组合系数 α_l , 由此构建的目标函数如下:

$$\min \left\| \sum_{l=1}^L \alpha_l \omega_l^T - \omega_p^T \right\|_2 \quad (11)$$

式中: ω_p 为第 p 种方法确定的指标权重向量。

根据矩阵微分性质, 式(11)的最优化一阶导数条件为:

$$\sum_{l=1}^L \alpha_l \omega_p \omega_l^T = \omega_p \omega_p^T \quad (12)$$

与上式等价的线性方程组为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \cdots & \omega_1 \omega_L^T \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_L \omega_1^T & \cdots & \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \vdots \\ \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

3) 计算组合权重。由式(13)得到优化组合系数 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$, 取绝对值后进行归一化处理 $\alpha_l^* = |\alpha_l| / \sum_{l=1}^L |\alpha_l|$ 。将归一化处理后的优化组合系数 α_l^* 带入式(10)即可求得组合权重 ω^* 为:

$$\omega^* = \sum_{l=1}^L \alpha_l^* \omega_l^T \quad (14)$$

2.2 云模型

云模型是一种处理不确定性和模糊性的重要工具, 可以将随机性和模糊性有机结合, 实现定性概念和定量数值之间的转换^[15]。云模型利用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_c 等数字特征来全面描述定性概念的不确定性, 并通过云发生器实现定性概念与定量

数值相互转换。

云发生器是云模型建立定性和定量之间相互联系的映射关系的工具,分为正向发生器和逆向发生器。正向发生器可实现从定性概念到定量数值的转换,在道路塌陷风险评价中,根据各风险等级的数字特征,生成满足特定分布的云滴,形成评价标准云图。逆向发生器可以实现从定量数据到定性概念的转换,在道路塌陷风险评价中,可根据指标评分分值数据,计算出这些数据对应的数字特征,形成综合云图,并通过与标准云图的对比分析,实现对道路塌陷风险的定性评价。

其主要步骤如下:

1) 确定评价标准云。在区间 $[0, 100]$ 内划分4个区段,分别作为各风险等级的评价标准,并按式(15)~(17)分别计算各风险等级评价标准云的数字特征。

$$E_{xi} = (x_i^{\max} + x_i^{\min})/2 \quad (15)$$

$$E_{ni} = (x_i^{\max} - x_i^{\min})/6 \quad (16)$$

$$H_e = k \quad (17)$$

式中: E_{xi} 、 E_{ni} 、 H_e 分别为第*i*个评价标准云的期望、熵、超熵, $i=4, 3, 2, 1$; x_i^{\max} 和 x_i^{\min} 分别为对应区段的上限和下限; k 为常数,根据评价指标的模糊程度确定,本文基于经验取 $0.5^{[5-7]}$ 。

2) 确定指标评价云。针对不同专家对不同指标的评分分值,形成 $n \times m$ 的评价矩阵 $D=(d_{ij})_{m \times n}$ 。其中, d_{ij} 为第*i*个专家对第*j*个评价指标打分; n 为专家个数; m 为指标数量。然后使用逆向云发生器,按式(18)~(21)分别计算每个指标下所有专家评分结果的期望、熵、超熵和方差分别为:

$$E_{sj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ij} \quad (18)$$

$$E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_{ij} - E_{sj}| \quad (19)$$

$$H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \quad (20)$$

$$S_j = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_{ij} - E_{sj})^2 \quad (21)$$

3) 计算综合评价云。将基于博弈论组合赋权后的权重指标 ω_j 结合式(22)~(24),计算综合评价云的数字特征:

$$E_x = \sum_{j=1}^n (E_{xj} \times \omega_j) \quad (22)$$

$$E_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E_{nj}^2 \times \omega_j)} \quad (23)$$

$$H_e = \sum_{j=1}^n (H_{ej} \times \omega_j) \quad (24)$$

4) 绘制标准云图和综合评价云图,并基于综合评价云图与标准云图进行比较,确定综合评价云图处于评价集中的哪个风险评价等级。

3 应用与验证

3.1 评价对象选取

选取某市人民路重要区段作为评价对象,评价过程包括评价指标重要性排序及赋分、指标权重计算、风险等级确定,并结合探地雷达探测结果对风险等级进行验证。

人民路是该市的主干路之一,交通流量大,周边分布着大量的商业建筑和住宅小区。待评价路段全长约800 m,建成于2007年,路面类型为沥青混凝土路面。近年来,该道路周边进行了多个地下工程建设,包括地铁车站施工、商场深基坑施工等。为保障道路的安全运营,对该道路塌陷风险进行全面、准确的评估,以便及时采取有效的预防和控制措施。

城市道路相邻交叉口间距约400~500 m,为准确评估道路风险情况和确定道路探测需求,每200 m路段作为一个评价单元。该评价道路全长800 m,因此划分为4个评价单元,分别记为 L_{m1} 、 L_{m2} 、 L_{m3} 和 L_{m4} 。

3.2 指标权重计算

本次评价邀请5位道路设计、施工、养护等方面的专家,通过问卷调查的方式对不同层级的评价指标分别进行重要性排序,并判断排序后相邻指标间重要性程度比值。同时,结合道路现状,采用百分制的模式,邀请专家逐一对各评价指标予以分值评定。

3.2.1 博弈论组合赋权

基于各专家对同级评价指标的重要性排序和排序后相邻指标的重要性程度比值,按照式(2)和(3)分别计算一、二级指标权重。同时,引入熟悉程度分值 d_j ,根据专家对道路塌陷风险评价工作的熟悉程度分别赋值,按照式(4)计算出5位专家在赋权过程中的权重系数分别为0.214、0.143、0.143、0.286和0.214。最后,按式(5)计算出的一、二级评价指标的最终权重,见表2。

表2 道路塌陷一、二级指标权重(G1法)

Table 2 Weights of first- and second-level indicators for road collapse risk (G1 method)

一级指标	一级权重 ω_1	二级指标	单层权重 ω'	二级权重 $\omega_1 \times \omega'$
涉水管线因素A	0.320 3	管道缺陷A ₁	0.414 2	0.132 7
		服役年限A ₂	0.301 9	0.096 7
		管道材质A ₃	0.283 9	0.091 0
施工因素B	0.256 8	施工类型B ₁	0.464 5	0.119 3
		施工位置B ₂	0.535 5	0.137 5
自然因素C	0.186 3	岩土体条件C ₁	0.408 6	0.076 1
		年降雨量C ₂	0.263 5	0.049 1
		水环境条件C ₃	0.327 9	0.061 1
道路因素D	0.236 6	路面现状D ₁	0.384 8	0.091 0
		交通荷载D ₂	0.305 9	0.072 4
		历史塌陷D ₃	0.309 3	0.073 2

3.2.2 客观权重计算

根据各专家对二级指标评分分值的平均值,形成5×11的评价指标数值矩阵B=(b_{ij})_{5×11}。按照式(6)~(9),分别得到一、二级指标的权重,见表3。

表3 道路塌陷一、二级指标权重(EW法)

Table 3 Weights of first- and second-level indicators for road collapse risk(EW method)

一级指标	一级权重 ω_1	二级指标	二级权重 ω_2
涉水管线因素A	0.300 8	管道缺陷A ₁	0.117 7
		服役年限A ₂	0.118 3
		管道材质A ₃	0.064 8
施工因素B	0.205 5	施工类型B ₁	0.119 4
		施工位置B ₂	0.086 1
自然因素C	0.275 4	岩土体条件C ₁	0.064 8
		年降雨量C ₂	0.082 4
		水环境条件C ₃	0.128 2
道路因素D	0.218 3	路面现状D ₁	0.085 1
		交通荷载D ₂	0.069 1
		历史塌陷D ₃	0.064 1

3.2.3 博弈论确定组合权重

基于博弈论的基本原理,将G1法和EW法确定的11个二级指标的权重形成的指标向量矩阵带入式(10)~(13),计算得到归一化优化组合系数 $\alpha_1^*=0.591 8, \alpha_2^*=0.408 2$ 。将归一化处理后的优化组合系数带入式(14)即可求得组合权重。同时,为了进一步验证博弈论组合赋权的合理性,根据加法合成^[5]和乘法归一^[6]的计算公式,分别求得组合权重,见表4。

由表4可知,使用加法合成求解组合权重时,在简

表4 不同组合赋权方法下评价指标的权重

Table 4 Weights of evaluation indicators under different combination weighting methods

评价指标	G1法权重	EW法权重	组合权重		
			博弈论	加法合成	乘法归一
管道缺陷A ₁	0.132 7	0.117 7	0.126 6	0.125 2	0.167 5
服役年限A ₂	0.096 7	0.118 3	0.105 5	0.107 5	0.122 6
管道材质A ₃	0.091 0	0.064 8	0.080 3	0.077 9	0.063 2
施工类型B ₁	0.119 3	0.119 4	0.119 3	0.119 4	0.152 7
施工位置B ₂	0.137 5	0.086 1	0.116 5	0.111 8	0.126 9
岩土体条件C ₁	0.076 1	0.064 8	0.071 5	0.070 5	0.052 9
年降雨量C ₂	0.049 1	0.082 4	0.062 7	0.065 7	0.043 3
水环境条件C ₃	0.061 1	0.128 2	0.088 1	0.094 7	0.084 0
路面现状D ₁	0.091 0	0.085 1	0.089 0	0.088 0	0.083 0
交通荷载D ₂	0.072 4	0.069 1	0.071 0	0.070 7	0.053 6
历史塌陷D ₃	0.073 2	0.064 1	0.069 5	0.068 6	0.050 3

单相加求平均值的过程中,不同重要程度的指标权重的差异性在合成过程中被弱化,难以体现指标间的重要性差异程度,例如指标“管道材质”(0.077 9)和指标“路面现状”(0.088 0)、指标“岩土体条件”(0.070 5)和指标“交通荷载”(0.070 7)经加法合成后指标权重基本相同。

使用乘法归一法求解组合权重时,对每个指标的权重产生乘法作用后进行归一化处理,会导致主客观赋权法中权重较大的指标在评估中占据主导地位,权重较小的指标的作用被忽略,从而影响评估的全面性和准确性,例如指标“管道缺陷”(0.167 5)、指标“年降雨量”(0.043 3)。

而博弈论可以在主客观权重寻求妥协或一致,求解与主客观权重离差极小化的权重分配系数,可以合理弥补G1法主观因素影响大、EW法数据依赖性高等缺点,得到的指标权重更加合理。

3.3 风险分级划分

将道路塌陷风险的等级分为4级(I级、II级、III级和IV级),分别表示低风险、中风险、高风险和极高风险。现有的相关文献中确定风险等级评价区间分值多采用百分制等分法^[5-7],本文根据专家意见对评价区间分值划分进行了优化,见表5。根据各风险等级的评价区间分值,按式(15)~(17)计算标准云的数字特征,各风险等级的数字特征见表5。并通过正向云发生器,生成道路塌陷风险等级标准云图,如图2所示。

针对不同专家对不同指标的评分分值,形成5×

表 5 道路塌陷风险等级及标准云数字特征

Table 5 Road collapse risk levels and standard cloud numerical characteristics

风险等级	风险描述	评价区间	标准云数字特征
I 级	低风险	[0,30)	(15.0,5.000,0.5)
II 级	中风险	[30,60)	(45.0,5.000,0.5)
III 级	高风险	[60,80)	(70.0,3.333,0.5)
IV 级	极高风险	[80,100]	(90.0,3.333,0.5)

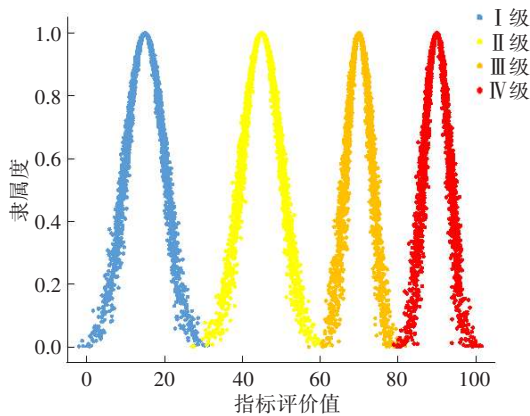


图 2 道路塌陷风险等级标准云

Fig. 2 Standard cloud for road collapse risk levels

11 的评价矩阵 $D=(d_{ij})_{5 \times 11}$ 。然后使用逆向云发生器,按式(18)~(21)分别计算每个指标下所有专家评分结果的云数字特征。将基于博弈论组合赋权后的权重指标 ω_j 结合式(22)~(24),计算不同评价单元的综合评价云的数字特征,见表 6。

表 6 不同评价单元的综合云数字特征

Table 6 Comprehensive cloud numerical characteristics of different evaluation units

评价单元	综合云数字特征		
	E_x	E_n	H_e
L_{m1}	25.851	3.855	1.296
L_{m2}	33.549	4.089	1.382
L_{m3}	26.097	3.935	1.110
L_{m4}	66.413	5.984	1.547

并通过正向云发生器生成不同评价单元的综合评价云图,如图 3 所示。

从上图可知,评价单元 L_{m1} 、 L_{m3} 的综合评价云介于 I 级和 II 级之间,并更加靠近 I 级风险,因此可以认定评估单元的塌陷风险等级为 I 级(低风险);评价单元 L_{m2} 的综合评价云介于 I 级和 II 级之间,并更加靠近 II 级风险,因此可以认定评估单元的塌陷风险等级为 II 级(中风险);评估单元 L_{m4} 的综合

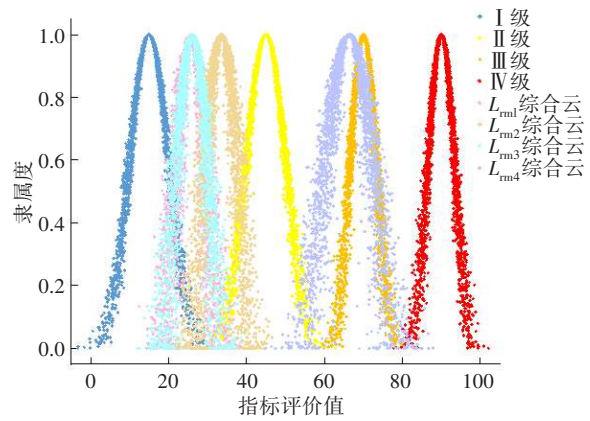


图 3 不同评价单元综合评价云图

Fig. 3 Comprehensive evaluation cloud diagrams for different evaluation units

评价云介于 II 级和 III 级之间,并更加靠近 III 级风险,因此可以认定评估单元的塌陷风险等级为 III 级(高风险)。

3.4 评价结果验证

地质雷达探测是发射天线向地下发射高频电磁波,当遇到空洞等电性差异界面时,部分电磁波反射并被接收天线接收,经处理、分析、解译后,能判断地下病害体特征。采用探地雷达对评价路段进行探测,并根据《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》(JGJ/T 437—2018)^[16]计算地下病害体的风险等级。本次探测共获取各类地下病害体 9 处(其中脱空 3 处、一般疏松 6 处),地下病害体详细信息见表 7。

表 7 地下病害体详细信息

Table 6 Detailed information on subsurface disease bodies

地下病害体信息					所在评价单元编号	所在评价单元风险等级
编号	类型	风险等级	深度/m	分布面积/m ²		
S01	一般疏松	II	0.5 ~ 1.4	9.84	L_{m2}	II 级
S02	一般疏松	II	0.6 ~ 0.9	7.98		
S03	一般疏松	II	0.9 ~ 1.3	9.20		
S04	一般疏松	II	0.7 ~ 1.0	6.20		
T01	脱空	III	0.11 ~ 0.17	3.12	L_{m4}	III 级
T02	脱空	III	0.49 ~ 0.54	1.30		
S05	一般疏松	II	0.5 ~ 1.0	10.60		
T03	脱空	III	0.47 ~ 0.52	3.90		
S06	一般疏松	II	0.7 ~ 1.2	8.80		

对比分析地下病害体的风险等级与所在评价单元的风险等级: II 级风险单元评价准确率为 100%,由于 III 级风险路段的风险源更加复杂, III 级

单元评价准确率为60%，总准确率为77.8%。地下病害体的分布、风险等级与评价单元的风险等级吻合度较高，这表明本文提出道路塌陷风险评价方法的适用性和准确性较好。

4 结论

1) 本文针对道路塌陷风险评价中主客观权重分配不合理的问题，将博弈论思想应用于主观赋权法(G1法)和客观赋权法(EW法)的权重组合优化中，并利用云模型综合考量道路塌陷的随机性和模糊性，实现风险等级的判定，并将该方法成功应用于某市人民路重要路段塌陷风险判定中。

2) 实例应用结果表明：博弈论可通过极小化权重离差实现科学组合赋权，较传统加法合成法而言，其指标间重要性差异程度显著强化，较乘法归一法而言，其小指标偏差问题明显改善；评价单元的风险等级与地下病害体的风险等级、吻合度较高，评价准确率为77.8%，该方法可为城市道路塌陷风险动态评价提供可靠工具。

参考文献(References):

- [1] 陶连金, 袁松, 安军海. 城市道路地下空洞病害发展机理及对路面塌陷的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(3): 289-293. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7262.2015.03.013.
TAO Lianjin, YUAN Song, AN Junhai. Development mechanism of cavity damage under urban roads and its influence on road surface subsidence [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2015, 25(3): 289-293. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7262.2015.03.013.
- [2] 叶远春, 宋谷长. 城市道路空洞风险评估方法研究[J]. 城市道桥与防洪, 2012(4): 209-213, 280. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2012.04.061.
YE Yuanchun, SONG Guchang. Study on risk assessment of underground void in urban road[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(4): 209-213, 280. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2012.04.061.
- [3] 魏会龙, 施秋华, 周金文, 等. 基于层次分析法的深圳市地面坍塌危险性评价[J]. 中国矿业, 2021, 30(增刊2): 110-116.
WEI Huilong, SHI Qiuhua, ZHOU Jinwen, et al. Risk assessment of ground collapse in Shenzhen based on analytic hierarchy process[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(sup 2): 110-116.
- [4] 刘文. 城市道路地面塌陷隐患熵权法评估模型及其应
用与验证[J]. 交通与运输, 2024, 40(5): 41-45.
LIU Wen. Assessment model of urban road collapse hazards and its application based on entropy weight method[J]. Traffic & Transportation, 2024, 40(5): 41-45.
- [5] 师文豪, 鞠俊杰, 王源, 等. 基于地质雷达探测和熵权二维云模型的城市道路塌陷风险评价方法[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(6): 161-168, 199. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20230800.
SHI Wenhao, JU Junjie, WANG Yuan, et al. Risk evaluation of urban road collapse based on ground penetrating radar detection and entropy weight two-dimensional cloud model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(6): 161-168, 199. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20230800.
- [6] 陈希, 陈正. 基于AHP-熵权法的上海市道路地下空洞风险预评估研究[J]. 中国市政工程, 2023(3): 102-105, 109, 121-122.
CHEN Xi, CHEN Zheng. Research on risk pre-assessment of underground caves in Shanghai roads based on AHP-entropy method [J]. China Municipal Engineering, 2023(3): 102-105, 109, 121-122.
- [7] 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. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2363.
ZHOU Ziyong, SHI Haoyu, DONG Yuliang, et al. Research on road collapse risk evaluation based on cloud model and AHP-EWM [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 1752-1761. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2363.
- [8] 余满仓, 吕敦玉, 孟舒然, 等. 城市地面塌陷灾害风险评估研究[J]. 地质与勘探, 2024, 60(1): 63-75. DOI: 10.12134/j.dzykt.2024.01.007.
YU Mancang, LYU Dunyu, MENG Shuran, et al. Research on risk assessment of urban ground collapse disaster [J]. Geology and Exploration, 2024, 60(1): 63-75. DOI: 10.12134/j.dzykt.2024.01.007.
- [9] 王学军, 郭亚军. 基于G1法的判断矩阵的一致性分析[J]. 中国管理科学, 2006, 14(3): 65-70. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2006.03.012.
WANG Xuejun, GUO Yajun. Analyzing the consistency of comparison matrix based on G1 method [J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(3): 65-70. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2006.03.012.
- [10] 陈昌彦, 肖敏, 贾辉, 等. 城市道路地下病害成因及基于综合探测的工程分类探讨[J]. 测绘通报, 2013(增刊2): 5-9.
CHEN Changyan, XIAO Min, JIA Hui, et al. The genesis of urban underground roads diseases and classification of engineer [J]. Bulletin of Surveying and

- Mapping, 2013(sup 2): 5-9.
- [11] 胡聿涵,白玉川,徐海珏. 近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J]. 公路, 2016, 61(9): 130-135.
HU Yuhan, BAI Yuchuan, XU Haijue. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China [J]. Highway, 2016, 61(9): 130-135.
- [12] 郭林飞,柴仕琦,董静怡,等. 我国城市路面塌陷事故统计分析[J]. 工程管理学报, 2020, 34(2): 49-54. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2020.02.010.
GUO Linfei, CHAI Shiqi, DONG Jingyi, et al. A statistical analysis of urban road collapse accidents in China [J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(2): 49-54. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2020.02.010.
- [13] 陈雨昂,唐荣,方建,等. 2014—2018年中国城市路面塌陷时空规律与原因分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 108-116. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.014.
CHEN Yuang, TANG Rong, FANG Jian, et al. Analysis on spatio-temporal law and causation of urban road collapse in China from 2014 to 2018 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(7): 108-116. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.014.
- [14] 艾欣,赵旭州,胡寰宇,等. G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3481-3490. DOI: 10.13335/j.1000-3673.ps.2019.2429.
AI Xin, ZHAO Xuzhou, HU Huanyu, et al. G1-entropy-independence weight method in situational awareness of power grid development [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3481-3490. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2429.
- [15] 徐征捷,张友鹏,苏宏升. 基于云模型的模糊综合评判法在风险评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 69-72. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.02.016.
XU Zhengjie, ZHANG Youpeng, SU Hongsheng. Application of risk assessment on fuzzy comprehensive evaluation method based on the cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2): 69-72. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.02.016.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准: JGJ/T 437—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for comprehensive detection and risk evaluation of underground disasters in urban area: JGJ/T 437—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

(责任编辑:薛仪;校对:熊怡)