

徐圣鑫, 卢雷, 刘曙光, 等. 基于模糊 TOPSIS 和云模型的城镇供水管道安全风险评估[J]. 净水技术, 2026, 45(3): 147-155.

Xu S X, Lu L, Liu S G, et al. Risk assessment for safety of urban water supply pipelines based on fuzzy TOPSIS and cloud model [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(3): 147-155.

基于模糊 TOPSIS 和云模型的城镇供水管道安全风险评估

徐圣鑫, 卢雷, 刘曙光*, 钟桂辉, 王秋萍, 刘宇

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】 城镇供水管道是城市生命线工程的重要组成部分, 一旦发生故障, 不仅会威胁用户用水安全, 还可能导致大规模水资源浪费和重大经济损失。应用科学可靠的风险评估方法对供水管道进行全面的安全风险评估变得愈发关键, 是保障供水系统安全运行的重要手段。【方法】 基于供水管道运行特征和风险管理理论, 建立包含结构属性、运行状态、外部环境和服役属性多维度指标的风险评估体系, 并采用结构熵权法确定各指标权重。运用模糊逼近理想解排序 (TOPSIS) 算法对风险指标数据进行归一化处理与动态排序。通过云模型的三维特征参数 (期望、熵、超熵), 将定性风险描述映射为定量云滴分布, 评估供水管道风险水平, 确定关键影响因素。【结果】 开展了评估方法的实际案例应用, 结果表明: 测试供水管道云模型的期望值为 3.962, 以此为风险评估值, 管道属于低风险水平。通过二级指标风险云图分析, 管道主要风险源为结构属性, 要特别关注管道的腐蚀情况, 做好接口处的保护。【结论】 本文整合模糊数学与云模型技术优势提出的风险评估方法, 能有效评估供水管道的风险状态, 评估结果可为供水管道安全管理提供参考与指导。

关键词 供水管道 结构熵权法 模糊逼近理想解排序法 (TOPSIS) 云模型 风险评估

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)03-0147-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.03.015

Risk Assessment for Safety of Urban Water Supply Pipelines Based on Fuzzy TOPSIS and Cloud Model

Xu Shengxin, Lu Lei, Liu Shuguang*, Zhong Guihui, Wang Qiuping, Liu Yu

(Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] Urban water supply pipelines are critical components of municipal lifeline infrastructure. Pipeline failures not only jeopardize water supply safety but may also cause significant water resource losses and substantial economic damages. Implementing scientifically robust risk assessment method for comprehensive safety evaluation has become increasingly essential, serving as a vital measure to ensure the secure operation of water supply systems. [Methods] Based on pipeline operational characteristics and risk management theory, a multidimensional risk assessment system was established, incorporating structural attributes, operational status, external environment, and service attributes. The structural entropy weight method was employed to determine indicator weights, while the fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) algorithm was applied to normalize and dynamically rank risk indices. Quantitative risk levels and key influencing factors were identified by mapping qualitative risk descriptions to cloud droplet distributions using the three-dimensional parameters (expectation, entropy, and hyper-entropy) of the cloud model. [Results] A case study demonstrated the method's effectiveness, with the test pipeline's risk assessment value (cloud model expectation value) of 3.962, classified as low-risk. Analysis of secondary indicator risk cloud diagrams identified structural attributes as the primary risk source, particularly highlighting corrosion and joint degradation as critical concerns requiring prioritized attention. [Conclusion] This paper proposes a risk assessment method that integrates the advantages of fuzzy mathematics and cloud modeling technologies, which effectively evaluates the risk status of water supply pipelines. The assessment

[收稿日期] 2025-08-10

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3801001)

[作者简介] 徐圣鑫(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城镇供水管网的检测与评估, E-mail: 2330626@tongji.edu.cn。

[通信作者] 刘曙光(1962—), 男, 教授, 研究方向为水利工程、防洪工程、水文与水资源, E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn。

result can provide valuable references and guidance for pipelines safety management.

Keywords water supply pipelines structural entropy weight method fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) cloud model risk assessment

供水管道作为城市基础设施的关键组成部分,其运行状态直接影响供水安全和服务质量,是城市的生命线工程。随着我国城市化建设水平的提高,供水管道的数量不断增加,2023 年末供水管道敷设总里程为 115.3 万 km^[1]。然而,随着使用年限的上升,部分管道逐步进入老化期,在内外因素作用下易发生漏损、爆管、地面坍塌等事故的风险^[2],对城市安全造成威胁。风险评估作为风险隐患预测与薄弱环节定位的重要手段,可为生命线工程维护优先级的确定和修复措施的实施提供决策依据。开展供水管道风险评估对提升供水与城市安全具有重要现实意义。

近年来国内外学者在供水管道风险评估方法和应用上做了相关研究。王博彦等^[3]基于管网资产和运营基础数据,结合水力模拟数据,利用地理信息系统(GIS)、大数据技术对管网风险进行评估,结果显示:管网风险预测图与实际管网风险数据结果一致程度较高。戚雷强等^[4]应用管道埋深、管压、管材、管龄、管径、道路荷载、水龄 7 个评估指标构建了供水管网风险评估模型,并对上海市 MH 区供水管网进行风险评估。评估结果表明:管龄较长和管材较差的管道多处于高风险或危险状态。Zhang 等^[5]利用网络层次分析法(ANP)计算了各评价因素的权重。在此基础上,建立了基于 ANP-模糊综合评价方法的模型,并通过编制的程序对长三角地区供水管网的风险水平进行了评价。其他风险评估方法,如 Kent 法^[6]、组合赋权法^[7]等也常被用来获得简单的风险评估值。这些方法在一定程度上对供水

管道进行了风险识别,有助于供水管道安全管理,但仍存在指标选取不够全面、指标数据存在模糊性和不确定性、关键影响因素未识别等问题,一定程度上影响了评估结果的准确。针对这些突出问题,本文提出了一种集成模糊逼近理想解排序法(TOPSIS)与云模型的综合风险评估方法,并以某市供水管道为研究对象进行了评估应用。不仅能对供水管道进行详细准确的风险评估,确定风险级别,还可识别需要优化管理的关键风险因素。

1 供水管道风险评估指标体系构建

1.1 供水管道评估指标选择

评估指标是否具备科学性、准确性以及合理性,会直接对风险评估结果的可信度和有效性产生影响。供水管道健康状况受到内部因素(如管道材料、施工质量)和外部因素(如地质条件、气候条件)等诸多因素的综合影响,各因素之间存在着复杂的相互作用与关联关系,且管道系统本身呈现出高度的多样性和复杂性。因此在筛选评估指标时,既要尽可能涵盖所有可能影响供水管道安全的因素,还要能反映管道运行的动态变化,各指标也应尽量独立,避免重复计算。基于此,结合国内外学者的研究并参考《管道风险管理手册》^[8],同时考虑到专家的建议以及相关数据的可获取性,最终选定 4 项二级指标[结构属性(M_1)、运行状态(M_2)、外部环境(M_3)、服役属性(M_4)],19 项三级指标作为供水管道风险评估依据,建立的供水管道风险指标评估体系如图 1 所示。

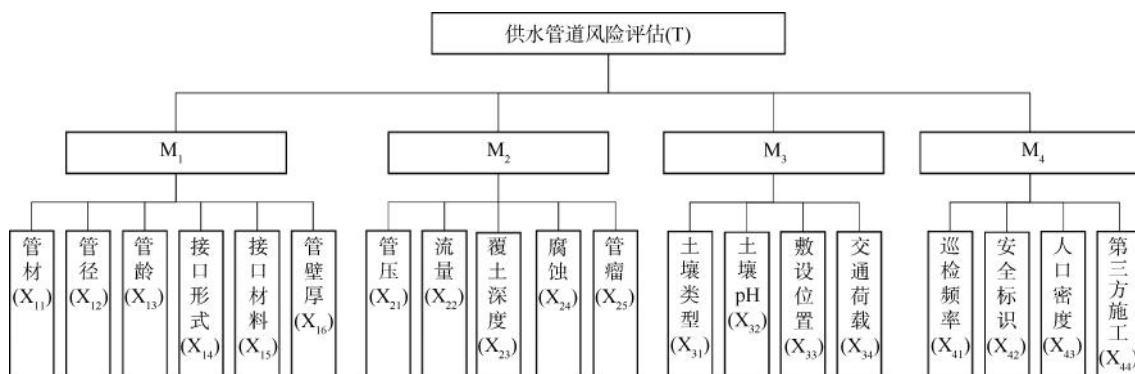


图 1 供水管道风险评估指标体系

Fig. 1 Index System of Water Supply Pipelines Risk Assessment

结构属性反映管道固有物理特性,包括管材类型、几何尺寸和连接构造等静态参数。该类指标通过管材、管径、管龄、接口形式、接口材料和管壁厚6项指标量化评估管道本体的抗风险能力。运行状态表征管道动态工况参数,涵盖压力波动、流体特性及结构健康状态。通过管压、流量、覆土深度、腐蚀和管瘤5项指标监测实际运行表现。外部环境体现管道所处环境胁迫因素,描述土壤特性与地表活动对管道的复合影响。土壤类型、土壤pH、敷设位置和交通荷载4项指标共同构成环境风险模块。服役属性评估运维管理水平,反映人为干预对风险缓释的作用。巡检频率、安全标识、人口密度和第三方施工4项指标构成管理维度。

1.2 评估指标权重确定

指标权重赋值方法通常可分为主观赋权法与客观赋权法两大类型。主观赋权法(如层次分析法、专家打分法等)基于专家经验判断,能有效融合领域知识,但易受个体认知偏差影响;客观赋权法(如信息熵法、变异系数法等)通过数学建模分析指标数据特征,虽保证计算客观性,但难以反映专业价值取向。为兼顾主客观优势,本文采用结构熵权法确定指标权重。该方法是结合主观权重法和客观权重法的权重分配法^[9]。其基本思想是分析指标及其相互关系,并联合德尔菲专家调查法和模糊分析法对指标进行分析,其基本步骤如下。

1.2.1 指标“典型排序”

根据德尔菲法对专家意见进行调查,将各指标按照重要程度进行典型排序。由 m 位专家对 n 个指标的排序矩阵记为 A ,称为指标的“典型排序”矩阵,如式(1)。

$$A = (a_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中: a_{ij} ——第 i 个专家对第 j 个指标的评价;
 m ——评判专家数;
 n ——指标数。

1.2.2 “盲度”分析

定义 A 隶属函数如式(2)。

$$b_{ij} = \frac{\ln(\lambda - a_{ij})}{\ln(\lambda - 1)} \quad (2)$$

其中: b_{ij} ——定义在 $[0, 1]$ 上的变量,是 a_{ij} 对应的隶属函数的定量转换值;

λ ——转化参数量,这里取 $\lambda = j + 2$ 。

假定每一位专家在对指标 a_{ij} 的评判上拥有相同的“话语权”,专家们对于第 j 个指标的平均认识程度如式(3)。

$$b_j = \frac{b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{mj}}{m} \quad (3)$$

其中: b_{mj} ——第 m 个专家对第 j 个指标的评价;

b_j ——专家们对第 j 个指标平均评价。

定义 Q_j 为专家对第 j 个指标的认知的不确定性,称为“认知盲度”,其计算如式(4)。

$$Q_j = \frac{[\max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}) - b_j] + [\min(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}) - b_j]}{2} \quad (4)$$

于是对于每一个指标 a_{ij} ,全体专家对它的总体认识度,记为 c_j ,如式(5)。

$$c_j = b_j(1 - Q_j) \quad (5)$$

1.2.3 归一化处理

通过归一化处理得到各指标权重,其计算如式(6)。

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (6)$$

其中: w_j ——第 j 个指标的权重。

2 基于模糊 TOPSIS 和云模型的风险评估

本文提出一种集成模糊 TOPSIS 与云模型的风险评估方法,其核心是通过两阶段处理实现风险评估的不确定性表征和风险值确定。首先基于专家对各指标的语言评价,采用模糊 TOPSIS 方法计算得到反映指标风险程度的特征值;随后将特征值输入云模型,转化为具有明确物理意义的三维特征参数(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e),并生成二级指标的风险云图形。最终通过云图形分析主要风险因素,以供水管道云模型期望值作为风险值确定风险等级。

2.1 模糊 TOPSIS 法计算指标风险特征值

模糊 TOPSIS 法综合了传统 TOPSIS 方法和三角模糊数的优点,可将模糊环境中的不确定性指标数据转化为可计算的数学形式,并排序风险方案,识别最需关注的高风险项,是对复杂环境下的工程进

行多因素综合评估的有效方法^[10]。其基本思想是识别评价指标的最理想解和最差理想解。

首先,应用三角模糊数转换专家语言变量,如表 1 所示。

表 1 语言变量和相应的三角模糊数

Tab. 1 Linguistic Variables and Corresponding Triangular Fuzzy Numbers

语言变量	三角模糊数
安全	(0, 1, 3)
低风险	(1, 3, 5)
中风险	(3, 5, 7)
高风险	(5, 7, 9)
危险	(7, 9, 10)

三角模糊数的隶属函数如式(7)所示。

$$\mu_{B(x)} = \begin{cases} 0, & x < p \\ \frac{x-p}{t-p}, & p \leq x \leq t \\ \frac{q-x}{q-t}, & t \leq x \leq q \\ 0, & x > q \end{cases} \quad (7)$$

其中: $B(x)$ ——论域 X 上的模糊数, $x \in X, B = (p, t, q)$ 是三角模糊数, 其中: $p \leq t \leq q$;
 μ ——三角模糊数 B 的隶属函数;
 p ——三角模糊数的最小可能值(左边界);
 t ——三角模糊数最可能值(峰值点);
 q ——三角模糊数的最大可能值(右边界)。

为了得到综合评价,每个指标需要由多个专家进行综合评价,第 j 组专家对第 i 个三级指标的评估用一个三角模糊 $x_{ij} = (p_{ij}, t_{ij}, q_{ij})$ 表示,专家们所有指标的评价结果形成决策矩阵 H , 如式(8)。

$$H = \begin{pmatrix} \hat{e}h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ \hat{e}h_{21} & h_{21} & \cdots & h_{2n} \\ \hat{e}\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \hat{e}h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中: h_{ij} ——多个专家的评价三角模糊数 x_{ij} 的算术平均值。

为了避免不同干扰因子物理量的影响,消除决策矩阵中数据量纲不同带来的影响,对决策矩阵进行归一化处理,得到风险特征矩阵 R , 转换结果如

式(9)。

$$R = \begin{pmatrix} \hat{e}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \hat{e}r_{21} & r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \hat{e}\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \hat{e}r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

r_{mn} ——第 n 组专家对第 m 个三级指标的风险评估标准化值。

r_{ij} 根据下面的式(10)~式(11)进行标准化,效益型指标采用式(10),成本型指标采用式(11)。

$$r_{ij} = \left(\frac{p_{ij}}{q_j^+}, \frac{t_{ij}}{q_j^+}, \frac{q_{ij}}{q_j^+} \right), q_j^+ = \max_i(q_{ij}) \quad (10)$$

$$r_{ij} = \left(\frac{p_j^-}{q_{ij}^-}, \frac{p_j^-}{t_{ij}^-}, \frac{p_j^-}{p_{ij}^-} \right), p_j^- = \min_i(p_{ij}) \quad (11)$$

其中: r_{ij} ——第 j 组专家对第 i 个三级指标的风险评估标准化值;

p_{ij} ——第 j 组专家对第 i 个三级指标的评估三角模糊数的左边界;

t_{ij} ——第 j 组专家对第 i 个三级指标的评估三角模糊数的峰值点;

q_{ij} ——第 j 组专家对第 i 个三级指标的评估三角模糊数的右边界;

q_j^+ ——效益型指标 j 的最大上界;

p_j^- ——成本型指标 j 的最小下界。

确定权重 $W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_n)$, 权重满足

$w_i > 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1, W$ 与标准化矩阵相乘,得到的加权模糊决策矩阵如式(12)。

$$V = R \times W = \begin{pmatrix} \hat{e}v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ \hat{e}v_{21} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \hat{e}\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \hat{e}v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中: v_{mn} ——第 m 个专家对第 n 个指标的加权模糊评分。

模糊最优理想解距离和最差理想解距离分别由式(13)和式(14)计算。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (14)$$

其中： v_{ij} ——加权后的模糊评价值；
 D_i^+ ——第 i 个二级指标到模糊最优理想解的综合距离；
 D_i^- ——第 i 个二级指标到模糊最差理想解的综合距离；
 v_j^+ ——第 j 个三级指标的模糊最优理想解分量；
 v_j^- ——第 j 个三级指标的模糊最差理想解分量。
 v_j^+ 和 v_j^- 的计算如式(15)和式(16)。

$$v_j^+ = \max_{i=1,2,\dots,m} (v_{ij}) \quad (15)$$

$$v_j^- = \min_{i=1,2,\dots,m} (v_{ij}) \quad (16)$$

定义了偏差系数 C_i ，以获得所有危险性指标的排序值。较大的 C_i 值表示与危害相关的较高风险。偏差系数 C_i 计算如式(17)。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (17)$$

2.2 应用云模型进行风险值确定

云模型是一种用于处理不确定性和模糊性问题的数学模型,它将概率论和模糊数学结合,通过3个关键参数(E_X 、 E_n 、 H_e)来生成云滴,产生不同的云模型。它们可以充分考虑评价指标内部的模糊性和随机性,并以定量的方式直观地表现出来^[11]。 E_X 是云滴在论域空间中分布的期望,是最能够代表定性概念的点, E_n 体现评价对象的随机性和模糊性, H_e 是熵的不确定的体现。 E_n 值越大,随机性越高。 H_e 值越小, E_n 的不确定性越小。可以用矩估计方法得到参数 E_X 、 E_n 、 H_e 的估计量。参数估计如式(18)~式(20)。

$$E_X = \bar{X} \quad (18)$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}| \quad (19)$$

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \quad (20)$$

其中： \bar{X} ——指标风险评价特征值均值；
 X_i ——第 i 个指标风险评价特征值；
 S^2 ——指标风险评价特征值方差。

根据指标的风险特征值和矩估计方法获得各三级指标的 E_X 、 E_n 、 H_e ，并进一步计算得到二级指标的

云模型参数,再运用正向云发生器生成风险云图形,根据该图形在坐标轴中的位置和形状,即可知供水管道的各类影响因素的风险状态。二级指标的云模型参数计算如式(21)~式(23)。

$$E_X = E_{X1}w_1 + E_{X2}w_2 + \dots + E_{Xn}w_n \quad (21)$$

$$E_n = \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} E_{n1} + \frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} E_{n2} + \dots + \frac{w_n^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} E_{nn} \quad (22)$$

$$H_e = \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} H_{e1} + \frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} H_{e2} + \dots + \frac{w_n^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} H_{en} \quad (23)$$

其中： E_{Xn} ——第 n 个指标的期望；
 W_n ——第 n 个指标的权重；
 E_{nn} ——第 n 个指标的熵；
 H_{en} ——第 n 个指标的超熵。

本文参考上海市地方标准《城市供水管网安全风险等级评估技术规范》(DB31/T 1332—2021),结合供水管道运行特征和评估方法数值区间,将供水管道风险等级分为安全、低风险、中风险、高风险、危险5个等级,具体分类如表2所示。利用各二级指标的云模型参数,再通过式(21)~式(23)可得到供水管

表2 风险等级分类
Tab. 2 Classification of Risk Levels

风险等级	风险值	风险等级描述
安全	(0,2]	供水管道满足预期的功能要求,并处于最佳状态
低风险	(2,4]	大部分供水管道状况良好,少部分出现恶化迹象
中风险	(4,6]	供水管道总体处于正常状态,一些区域显示出典型的恶化迹象
高风险	(6,8]	供水管道处于不可靠状态,低于设计标准,直接影响其功能和安全性
危险	(8,10]	供水管道无法满足预期的功能,并表现出明显的劣化迹象,损坏的可能性很高

道的云模型参数,以期望值为风险值,对照表 2 确定管道的风险等级。

3 应用实例

3.1 基本情况

本文选取了某市一段全长为 440.2 m 的供水管道作为案例评估对象。原始数据由当地水务部门提

供,包括从 GIS 输出的管道的属性和环境条件的信息。管道所处位置和周围街道建筑渲染如图 2 所示。管道全部埋在人行道下,附近有建筑物和公共汽车站。管道穿过一个人流量较大的公园的大门。此外,该管道没有明显的地面标识,其他的基本参数如表 3~表 6 所示。



图 2 3D 渲染下供水管道范围内的街道建筑

Fig. 2 Street Architecture in Scope of Pipelines Network in 3D Renderings

表 3 供水管道结构属性

Tab. 3 Structure Characteristics of Water Supply Pipelines

结构指标	内容
管材	铸铁
管径	DN1500
管龄	47 年
接口形式	承插
接口材料	石棉水泥
管壁厚度	18 mm

表 4 供水管道运行状态

Tab. 4 Operation Status of Water Supply Pipelines

运行状态指标	内容
管压	0.26 MPa
管流量	0.45 m/s
覆土深度	1.2 m
腐蚀程度	中度
管瘤	中度

表 5 供水管道外部环境

Tab. 5 External Environment of Water Supply Pipelines

外部环境指标	内容
土壤类型	粉砂土
土壤 pH 值	6.2
敷设位置	支路人行道
交通荷载	标准轴载 BZZ-100

表 6 供水管道服役属性

Tab. 6 Service Attributes of Water Supply Pipelines

服役属性指标	内容
巡检频率	每月 1 次
安全标识	无
人口密度	32 935 人/m
第三方施工	1 处

3.2 风险评估指标权重

本文邀请了来自城市水务公司、设计院和大学的 3 组专家参与指标评价,3 组专家均具有丰富的供水管道研究或工程实践经验。通过式 (1)~式 (6) 计算各二级指标的权重,同理可得相应的三级指标权重,如表 7~表 8 所示。

表 7 二级指标的权重计算

Tab. 7 Weight Calculations for Secondary Indices

项目	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
专家组 1	1	3	2	4
专家组 2	2	1	4	3
专家组 3	1	2	4	3
b_j	0.953 8	0.848	0.574 2	0.598 6
$1 - Q_j$	0.976 9	0.993 3	0.928 2	0.958 0
C_j	0.931 8	0.842 3	0.533 0	0.573 5
w_j	0.323 5	0.292 4	0.185 0	0.199 0

表 8 三级指标的权重计算

Tab. 8 Weight Calculations of Third-Level Indices

二级指标	二级指标权重	三级指标	三级指标权重	相关权重
结构属性	0.323 5	管材	0.230 0	0.074 4
		管径	0.160 5	0.051 9
		管龄	0.211 8	0.068 5
		接口形式	0.178 0	0.057 6
		接口材料	0.137 7	0.044 6
		管壁厚	0.081 9	0.026 5
		运行状态	0.292 4	管压
流量	0.232 0	0.067 8		
覆土深度	0.107 0	0.031 3		
腐蚀	0.245 4	0.071 8		
管瘤	0.169 6	0.049 6		
外部环境	0.185 0	土壤类型	0.201 6	0.037 3
		土壤 pH	0.197 4	0.036 5
		敷设位置	0.327 5	0.060 6
		交通荷载	0.273 5	0.050 6
		服役属性	0.199 0	巡检频率
安全标识	0.147 3	0.029 3		
人口密度	0.288 0	0.057 3		
第三方施工	0.318 6	0.063 4		

注:相关权重是指各三级指标相对于总目标(供水管道整体风险)的全局权重。数值上是二级指标权重与对应三级指标权重的乘积。

3.3 模糊 TOPSIS 计算指标风险特征值

本文对影响供水管道安全风险 19 个三级指标的发生可能性进行了评估。根据表 1 中的语言变量对应的三角模糊数,三级指标的评价结果和归一化评价结果如表 9 所示。用数学期望值方法将归一化三角模糊数转化为特征值,如图 3 所示。

表 9 归一化评价结果

Tab. 9 Assessment Results of Normalization

指标	(E_X, E_n, H_e)	指标	(E_X, E_n, H_e)
X ₁₁	(0.467, 0.633, 0.767)	X ₂₅	(0.233, 0.500, 0.667)
X ₁₂	(0.433, 0.633, 0.833)	X ₃₁	(0.000, 0.100, 0.300)
X ₁₃	(0.500, 0.700, 0.867)	X ₃₂	(0.067, 0.233, 0.433)
X ₁₄	(0.067, 0.233, 0.433)	X ₃₃	(0.000, 0.100, 0.300)
X ₁₅	(0.500, 0.700, 0.833)	X ₃₄	(0.067, 0.233, 0.433)
X ₁₆	(0.033, 0.167, 0.367)	X ₄₁	(0.033, 0.167, 0.367)
X ₂₁	(0.000, 0.100, 0.300)	X ₄₂	(0.433, 0.633, 0.833)
X ₂₂	(0.000, 0.100, 0.300)	X ₄₃	(0.333, 0.500, 0.067)
X ₂₃	(0.233, 0.367, 0.533)	X ₄₄	(0.033, 0.167, 0.367)
X ₂₄	(0.700, 0.900, 1.000)		

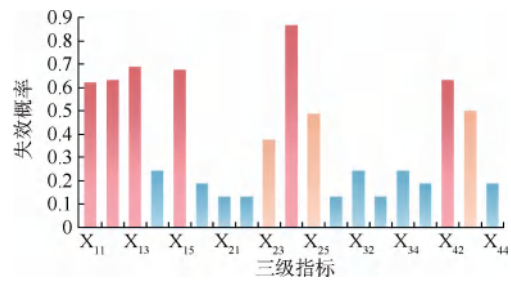


图 3 三级指标失效风险特征值

Fig. 3 Risk Eigenvalues of Third-Level Indices

用式(13)~式(17)计算了各二级指标对于供水管道失效风险指标的偏差系数 C_i , 4 个二级指标的偏差系数如图 4 所示,偏差系数在 0~1,系数值越大,发生供水管道事故的风险值也越大。由图 4 可知, M_1 结构属性数值最大,其次是 M_2 运行状态。 M_3 外部环境和 M_4 服役属性的影响较小。因此,该供水管道安全维护应首先关注与管材、管龄等结构因素相关的病害,例如老化、腐蚀等。

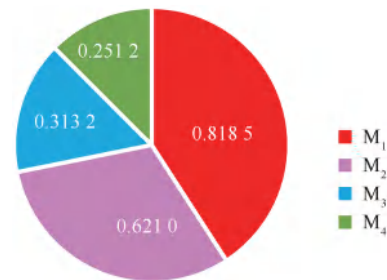


图 4 二级指标偏差系数

Fig. 4 Deviation Coefficients of Second-Level Indices

3.4 云模型的风险评估

三级指标风险特征值转换为云模型的 3 个关键参数,如表 10 所示。采用虚拟云算法进行求解。进一步得到了该供水管道的二级指标风险评价云图,如图 5 所示。最后通过式(21)~式(23)得出该供水管道云模型的 E_X, E_n, H_e 分别为 3.962、1.048、0.226,以 3.962 作为管道的风险值。

3.5 结果讨论

基于模糊 TOPSIS 和云模型集成的风险评估方法,以云模型期望值为风险值,该供水管道风险值为 3.962,处于低风险水平。应加强线路巡检管理,每季度不少于一次检漏。且由图 5 可知,二级指标 M_1 (结构属性)的风险值最高,为 5.923,其他 3 个指标风险值都在 4 以下,这也与模糊 TOPSIS 算法得到的差异系数结果一致。分析表明,尽管该管道在结构

表 10 云模型的典型特征值
Tab. 10 Typical Eigenvalues of Cloud Model

指标	(E_x, E_n, H_e)	指标	(E_x, E_n, H_e)
X ₁₁	(8.333, 1.114, 0.733)	X ₂₅	(3.667, 1.114, 0.732)
X ₁₂	(6.333, 0.633, 0.833)	X ₃₁	(1.000, 0.000, 0.000)
X ₁₃	(7.000, 1.671, 3.634)	X ₃₂	(2.333, 1.114, 0.732)
X ₁₄	(2.333, 1.114, 0.733)	X ₃₃	(1.000, 0.000, 0.000)
X ₁₅	(7.000, 3.342, 11.525)	X ₃₄	(2.333, 1.114, 0.732)
X ₁₆	(1.667, 1.114, 0.733)	X ₄₁	(1.667, 1.114, 0.732)
X ₂₁	(1.000, 0.000, 0.000)	X ₄₂	(6.333, 1.114, 0.732)
X ₂₂	(1.000, 0.000, 0.000)	X ₄₃	(5.000, 3.342, 15.674)
X ₂₃	(3.667, 4.456, 20.862)	X ₄₄	(1.667, 1.114, 0.732)
X ₂₄	(9.000, 0.000, 0.000)		

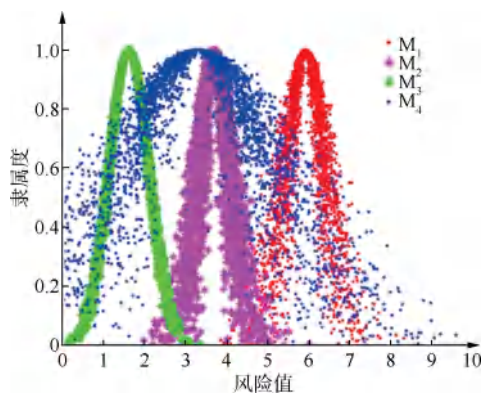


图 5 供水管道二级指标失效风险评价云图

Fig. 5 Evaluation Cloud Image of Failure Risks for Second-Level Indices of Water Distribution Network

属性上存在明确劣势(如普通铸铁管材、47 年管龄),但其良好的运行状态(压力稳定、腐蚀程度中等)与温和的外部环境(支路人行道轻荷载、偏中性土壤)共同构成了风险补偿,降低了整体风险水平。需要指出的是,管道结构属性被识别为首要风险源,这充分揭示了其自身老化和材质问题的严重性。尽管当前综合风险等级较低,表明在现有工况下风险可控,但应认识到,该结果依赖于当前温和的运行环境;一旦运行条件恶化,风险等级可能快速跃升。因此,针对该管道的安全管理,应在维持现有运行环境的同时,将维护重点集中于结构本身,及时实施管道防腐与接口保护等针对性措施。指标 M_4 的云滴分布最离散、最厚,说明服役环境对供水管道的损害具有最大的模糊性和不确定性,难以量化。这段管道没有设置地面标识和标志,周围有住宅区和公园,人口密集,第三方损害的可能性较大且具有很高的不

确定性。为了减少第三方损害的可能性,可以增加一些地面标识。

综上所述,本研究构建的评估指标体系涵盖了结构、运行、环境及服役四大类共 19 项指标,旨在全面反映管道的综合风险。然而,也需认识到,由于历史运维档案不完整,如“历史维修频率”等动态运维数据未能纳入本次分析,这可能在长期风险评估的动态精准性上存在局限。在后续研究中,收集并融合此类运维大数据,将是提升模型时效性与预警能力的重要优化方向。

4 结论

本文针对供水管道风险评估中传统方法指标权重分配不合理,指标数据具有不确定性和模糊性的突出问题,提出了一种集成模糊 TOPSIS 与云模型的综合风险评估方法,并以某市供水管道为研究对象进行了评估应用。得到的结论如下。

(1)建立的评估指标体系包括结构状态、运行功能、外界环境、人为因素等多方面内容,系统性地整合了影响管道安全的内外部因素。且采用结构熵权法整合主客观信息,实现了指标权重的科学分配。

(2)集成模糊 TOPSIS 与云模型的综合风险评估方法通过三角模糊数将专家语言评价转化为区间得分,可降低主观不确定性,利用云模型充分考虑风险因素的模糊性与不确定性特征,可识别关键风险源,提高评估结果的可靠性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2023[M]. 北京:中国城市出版社, 2024.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook in 2023[M]. Beijing: China City Press, 2024.
- [2] 张浩祥. 城市供水管网管道风险评估研究与应用[D]. 西安:长安大学, 2020.
Zhang H X. Risk assessment of pipeline and application in urban water supply network[D]. Xi'an: Changan University, 2020.
- [3] 王博彦, 戴雄奇, 林峰, 等. 基于大数据的城市供水管网风险评估模型研究[J]. 给水排水, 2020, 46(7): 154-157.
Wang B Y, Dai X Q, Lin F, et al. Research of risk assessment model of urban water supply network base on big data[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(7): 154-157.
- [4] 戚雷强, 刘思维, 孙晓峰. 基于动态模拟的城市供水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2022, 40(3): 140-144.

- Qi L Q, Liu S W, Sun X F. Study on risk assessment of urban water supply network based on dynamic simulation [J]. Municipal Engineering Technology, 2022, 40(3): 140-144.
- [5] Zhang W J, Lai T T, Li Y. Risk assessment of water supply network operation based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(1): 0000602.
- [6] Akbarinia G R, Gilani N, Mohhammadzadeh S, et al. Application of Kent Muhlbauer method to risk assessment of urban gas pipelines [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(1): 0000601.
- [7] 熊凡, 李沛鸿, 袁逸敏, 等. 基于 GIS 和组合赋权的城市洪涝灾害风险评估[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 60-66.
Xiong F, Li P H, Yuan Y M, et al. Urban flood disaster risk assessment based on GIS and combined weights [J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 60-66.
- [8] W. Kent M. 管道风险管理手册[M]. 杨嘉瑜, 张德彦, 吴俊, 等, 译. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2005.
W. Kent M. Pipeline risk management manual Second Edition [M]. trans. by Yang J Y, Zhang D Y, Wu J, et al. 2th ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [9] Zhao J R, Tian J D, Meng F X, et al. Safety assessment method for storage tank farm based on the combination of structure entropy weight method and cloud model [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 75: 104709. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104709.
- [10] Aljanabi A R A, Ghafour K M. Fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods of analysing online impulsive buying of organic food: A cognitive-affective decision-making perspective [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2024, 46(4): 7823-7838.
- [11] Sun P, Zhang R Z, Qiu X W. A Survey on Cloud Model [J]. Journal of Internet Technology, 2023, 24(5): 1159-1167.

(上接第 146 页)

- [8] 余维, 王欣, 陈斌, 等. 基于贝叶斯优化极端梯度提升树的电缆状态分类研究 [J]. 郑州大学学报: 理学版, 2025, 57(6): 1-7.
She W, Wang X, Chen B, et al. Research on cable condition classification based on Bayesian optimization of extreme gradient boosting tree [J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2025, 57(6): 1-7.
- [9] 贺波, 马静, 高赫余. 基于多粒度特征和 XGBoost 模型的城市日供水量预测 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 43-49.
He B, Ma J, Gao H Y. Predicting urban daily water supply based on multi-granularity feature and XGBoost integrated model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 43-49.
- [10] 温家鸣, 郭纯青, 李新建, 等. 基于 BP 神经网络的桂林生态城市建设需水量预测 [J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 47-50.
Wen J M, Guo C Q, Li X J, et al. Water demand forecast of eco-city construction in Guilin City based on BP neural network [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 47-50.
- [11] Narayanan L K, Sankaranarayanan S, Rodrigues J, et al. Water demand forecasting using deep learning in IoT enabled water distribution network [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2020, 15(6): 141-147.
- [12] 马飞虎, 雷皓安, 孙翠羽, 等. 基于 RFE-OPTUNA-XGBoost 模型的高速公路逃费模式识别 [J]. 应用科学学报, 2024, 42(5): 857-870.
Ma F H, Lei H A, Sun C Y, et al. Highway toll evasion patterns identification based on RFE-OPTUNA-XGBoost model [J]. Journal of Applied Sciences, 2024, 42(5): 857-870.
- [13] 崔晓彤, 靳亚红, 兰凤, 等. 基于多光谱影像的冬小麦土壤含盐量反演研究 [J]. 河北农业大学学报, 2025, 48(1): 107-115, 126.
Cui X T, Jin Y H, Lan F, et al. Inversion of salt content in winter wheat soil based on multi-spectral images [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2025, 48(1): 107-115, 126.