

基于网络层次分析法的地铁盾构隧道渗漏水 风险灰色模糊综合评价

王晓睿¹, 常昊东¹, 黄春晖², 叶青³, 翟金中³

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046;

2. 郑州地铁集团, 河南 郑州 450014; 3. 中铁十一局集团有限公司, 湖北 武汉 430061)

摘要: 地铁盾构隧道中的渗漏水问题不仅会破坏地铁线路, 还会引起隧道变形等病害。为探究地铁盾构隧道渗漏水原因, 建立科学有效的防范措施, 以现场调研为基础, 结合网络层次分析法与灰色模糊综合评价法, 通过分析渗漏水原因, 构建盾构隧道渗漏水风险指标体系, 建立基于 ANP 的灰色模糊综合评判模型, 并以郑州某地铁区间项目为例, 对盾构隧道渗漏水进行综合评价。结果表明: 盾构隧道渗漏水的主要影响因素包括密封垫老化和不良的地下水环境及隧道覆水深度。所建立的评价模型能够准确评估城市地铁盾构隧道工程的渗漏水风险, 为城市地下交通渗漏水风险的综合评估提供了一种新的思路和方法。

关键词: 网络层次分析法; 灰色模糊综合评价法; 盾构隧道; 渗漏水; 综合评价

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0180-06

Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation of Leakage Risk of Subway Shield Tunnels Based on Analytic Network Process

WANG Xiaorui¹, CHANG Haodong¹, HUANG Chunhui², YE Qing³, ZHAI Jinzhong³

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou,

He'nan 450046, China; 2. Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450014, China;

3. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430061, China)

Abstract: Leakage of water is a common issue in subway shield tunneling which not only damages the subway infrastructure but also leads to tunnel deformation, resulting in disruptions to train services. Moreover, water leakage can exacerbate the development of other tunnel-related issues, creating a chain reaction of impacts. Therefore, to thoroughly investigate the causes of water leakage in subway shield tunnels and establish scientifically effective preventive measures, based on on-site investigations, this work combines the Analytic Network Process (ANP) with the Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation Method to analyze the reasons for water leakage by constructing a risk indicator system for shield tunnel water leakage and establishing a Grey Fuzzy comprehensive evaluation model based on ANP. Zhengzhou subway section project was taken as an example to comprehensively assess water leakage in shield tunnels. The results indicate that the main influencing factors of water leakage in shield tunnels include seal pad aging, adverse groundwater conditions, and tunnel cover water depth. The evaluation model established is capable of accurately assessing the water leakage risk in urban subway shield tunnel projects, providing a new approach and method for the comprehensive assessment of water leakage risks in urban underground transportation.

Keywords: analytic network process; grey fuzzy comprehensive evaluation method; shield tunnel; leakage water; comprehensive evaluation

随着城市的快速发展和地下空间的大力开发,我国地铁的总里程数截至2022年已达8 012.85 km。然而,在地铁盾构隧道规模、数量及运营年份增加的同时,盾构隧道渗漏水问题也日益突出,对国家可持续发展及人民群众的生命财产安全带来了严重威胁。同时,由于地铁盾构隧道位于城市地下,其渗漏水原因往往受到地质条件、自然环境等多种因素叠加的影响。因此,对盾构隧道渗漏水问题进行全面的分析和评价,制定有效的防控措施,具有十分重要的作用。

在过去的研究中,盾构隧道渗漏水问题被广泛关注,各类影响因素被提出并被研究者们进行了初步的探索。在渗漏水因素方面,葛双双等^[1]总结了我国不同地层的盾构隧道病害类型,其次结合不同指标划分隧道渗漏水安全等级,并研究了不同类型病害的治理方案。江时雨等^[2]通过物元分析法、层次分析法、BP神经网络对隧道周围水压、隧道埋深以及转弯半径等11个评价指标因素进行风险评估。潘海洋等^[3-4]研究了隧道围岩土体、地下水和自然环境等因素,并采用模糊综合评价法确定了隧道渗漏水风险等级。李鑫^[5]通过实地考察和资料分析,以某运营中的公路隧道为例,探究了隧道渗漏水的检测,并采用模糊数学法构建了风险评价指标体系。魏荣誉^[6]运用有限元方法模拟了隧道施工期和运营期渗漏水病害的产生机制,并提出了相应的防漏与堵漏措施。在风险评价方面,刘志祥^[7]通过隧道渗漏水病害现场调研及对管片土压力、钢筋应变的监测,建立了渗漏水模糊综合评价模型,实现了渗漏水从设计施工至后期运营的全寿命周期评估,并将其应用于扬州瘦西湖隧道工程。陈君^[8]建立了修正的模糊综合评价法,该方法统合了所有盾构隧道安全性影响因素,并将其运用在上海地铁1号线盾构隧道结构安全性综合分析中。石建勋等^[9]采用改进的层次分析法,以杭徽高速公路隧道为例,对隧道渗漏水体系进行了整体评价。陈梦捷等^[10]建立了包含4个三级19个二级指标的地铁盾构隧道施工期渗漏水风险评价体系,在此基础上构建了基于模糊熵的盾构施工渗漏水风险评价模型。Nabeel Ahma^[11]采用模糊集理论,量化分析了突水指标,使用模糊层次分析法确定了指标权重,构建了以巴基斯坦为突水灾害预测应用背景的区域模型。不难看出,现有研究所采用的方法大多从单一、独立因素的角度出发,未综合考虑盾构隧道的环境、施工、设计等因素

的综合影响。且由于盾构隧道渗漏水原因具有复杂性、综合性。渗漏水不仅受到众多因素的共同影响,同时各因素间也存在相互影响。因此,为了全面了解和评估盾构隧道渗漏水问题,本文将引入网络层次分析法(ANP)与灰色模糊综合评价法相结合的方法,提出基于模糊综合评价的地铁盾构隧道渗漏水风险评估模型,该模型考虑了多因素间的互相影响,通过构建多准则决策分析模型,对各影响因素进行综合评价。

1 地铁盾构隧道渗漏水现状及原因分析

由于地铁盾构隧道内外水压差异或地下水位的变化,水分可能通过地层裂缝、管片接缝或不完全密封的管片表面进入隧道。隧道内部的渗漏水现象主要表现为湿渍、滴漏或渗水、渗泥等形式。湿渍表现为盾构管片表面出现明显色泽变化的潮湿斑,滴漏会从隧道顶部或侧壁悬挂下来;渗水则会通过管片裂缝及接缝处或管片螺栓孔处渗透进入隧道内部,形成流挂水迹(见图1);渗泥是指渗漏水中掺杂着管片背后的土颗粒、泥砂等一同从渗漏部位流出的现象。本文针对郑州市地铁一号线隧道渗漏水情况做了详细调研。截止2022年底,郑州市地铁一号线隧道渗漏点共212处,其中包括82处滴漏(38.7%)、126处渗水(59.4%)、4处渗泥(1.9%)。

渗漏部位主要位于盾构隧道拱顶,共134处。其次是拱腰,共49处,拱底仅有1处。其余还有道床、联络通道渗漏28处。

结合现场调研结果与地质勘察报告发现,导致地铁盾构隧道渗漏的因素有很多,主要包括:不良的工程地质条件、自然环境的变化、施工技术不达标与组织不当、隧道自身设计缺陷及管片质量问题。



图1 盾构管片渗水

2 地铁盾构隧道渗漏水风险指标体系构建

隧道渗漏水病害的原因是多方面因素综合作用的结果,是隧道工程所处的环境复杂性所决定的。通过对已有研究成果、实地调研情况及现场勘察报告的整理,本文将地铁盾构隧道渗漏水病害总体归纳为:工程地质、自然环境、施工、隧道自身、管片五方面原因(见表 1)。

2.1 工程地质与水文地质因素对渗漏水的影响

工程地质因素例如岩土层的渗透性和稳定性,会影响地下水的流动性和渗漏速度。其次,地下水水位及成分的变化也会导致渗漏的发生,尤其是含有腐蚀性物质的地下水,可能对隧道管片与密封垫造成腐蚀,从而导致渗漏问题。

2.2 自然环境对渗漏水的影响

自然环境因素主要包括降雨量及温度变化,降雨量的增大可能会导致地下水位急剧上升,进而使渗漏水现象大量发生。另一方面,地层的温度变化会引起隧道结构膨胀或收缩,导致管片内力增大或缩小,同时也会影响防水材料性能。

2.3 施工因素对渗漏水的影响

在盾构隧道施工过程中,拼装质量例如千斤顶

压力过大、螺栓预紧力不达标可能导致管片接缝处应力增大;注浆量及注浆压力不当可能导致隧道周围土体过于紧密,引起隧道周围土体的沉陷和变形,进而影响隧道的稳定性和结构安全。以上两点因素都会使地下水渗透的可能性增加。此外,组织监管问题,如施工过程中的质量控制和监督不足,可能导致施工不规范,从而影响隧道防水工程质量。

2.4 隧道自身因素对渗漏水的影响

隧道的埋深、长度、转弯半径等设计参数可能会影响隧道管片所受地热能及地应力大小,使隧道管片产生错台、接缝张开及老化等现象;隧道整体的沉降与上浮现象以及覆水深度变化可能导致隧道自身受力不均,使隧道结构产生变形,进而增大运营期隧道的渗漏风险。

2.5 管片因素对渗漏水的影响

管片因素是导致盾构隧道渗漏的直接因素。管片自身的防水性能不足会导致管片出现湿渍甚至裂缝。其次,随着隧道运营时间的增加,密封垫会产生老化、硬化或损坏,失去其原有的密封性能,这将导致地下水直接渗透到隧道内部。此外,管片裂缝、错台和接缝张开量的增加也可能导致隧道渗漏问题的出现。

表 1 盾构隧道渗漏水风险指标

目标	影响指标因素	指标内容	指标内容说明
地铁盾构隧道渗漏水风险评估	工程地质与水文地质因素	地下水	地下水水位过高、含有腐蚀性成分等
		土层(体)特性	地质条件恶劣
	自然环境因素	温度变化	温度差异导致的胀缩效应、老化等
		降雨量	地下水位突然上涨
	施工因素	同步注浆	壁后注浆压力、注浆量控制不当
		拼装质量	施工没有达到技术要求
		组织监管问题	现场管理人员对施工过程监管不到位
	隧道自身因素	隧道埋深	岩土体条件与围岩压力变化
		隧道长度	盾构长度可影响隧道差异性沉降
		隧道转弯半径	转弯半径大小可影响管片接缝防水
		隧道差异性沉降	引起管片错台、裂缝等
		隧道覆水深度	影响管片受力、老化等
	管片因素	密封垫老化	老化导致接缝防水失效
		管片裂缝	材料开裂导致渗流
		管片错台	密封垫错位
		管片自防水	混凝土自身防水性能不佳
		管片接缝张开量	接缝应力过大

3 问卷调查与数据分析

本文以地铁盾构隧道施工、勘察、设计、运营单

位从业人员及相关专家作为对象,问卷共设置 17 个三级指标进行问卷选项设置,分别将上述风险指标对地铁车站渗漏水影响程度进行了调查,并统计了

各专家从事的工作类型。问卷共发放 150 份,回收有效问卷 106 份。根据问卷统计结果,本次问卷填写人员共包括施工单位从业人员 40 人(37.73%),勘察单位从业人员 6 人(5.66%),设计单位从业人员 19 人(17.92%),运营单位从业人员 47 名(44.34%)。其中,从事多种工作的专家共 6 人。

通过 SPSS17.0 信度和效度分析,可判断问卷具有良好结构效度。

4 ANP 结构模型的构建与指标权重计算

目前,大多数学者确定指标权重通常使用层次分析法(AHP),然而,AHP 存在一些局限性,其主要短板在于忽略了指标之间的相互关联。因此,为解决多目标、多准则问题,需要采用网络层次分析法(ANP)。相较于 AHP,ANP 在处理复杂的工程决策问题时更具优势,因为它充分考虑了指标之间的相互关系。ANP 的网络层次包括决策目标、决策准则

以及各决策指标及它们之间的关系,形成一个更为完整和综合的网络结构。这种方法的引入不仅有助于更全面地分析问题,还提高了决策过程的准确性和可靠性。

在网络层次分析法软件 yaanp 中,ANP 模型主要分为四种类型:单网络模型、层次模型、BOCR 模型和完全网络模型。ANP 单网络结构模型采用单一的网络结构来表示决策问题中各个准则之间的相互关系。其中所有的准则和子准则通过连接在一起的边相互关联。这样的模型结构相对简单,适用于一些较为简单的决策问题。本文的 ANP 模型即为单网络结构模型。

4.1 构建 ANP 单网络结构模型

根据盾构隧道工程的实际情况,建立基于 ANP 的地铁盾构隧道渗漏水风险评价模型。同时,根据调查问卷结果,最终确定指标间的相互影响关系,并依此构建渗漏水风险因素 ANP 单网络结构模型(见图 2)。

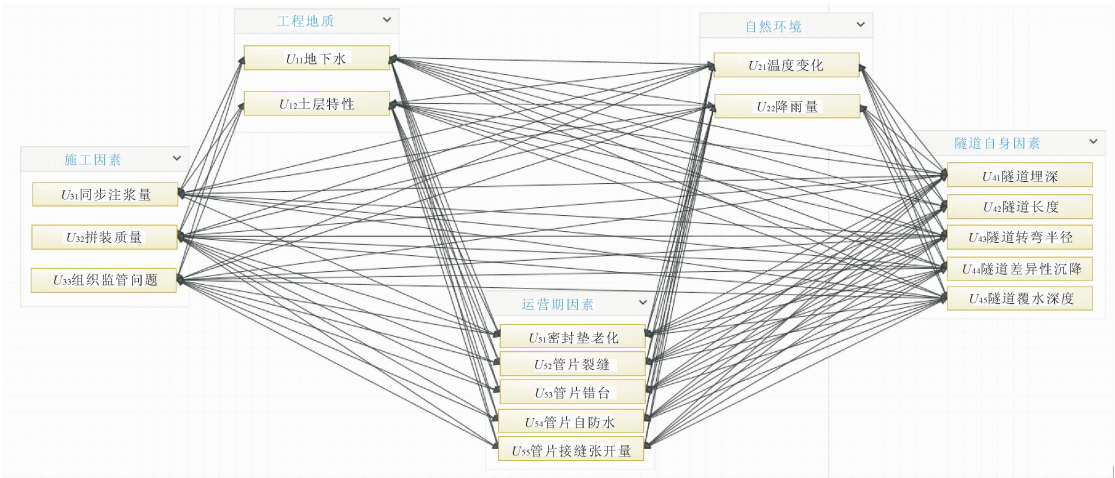


图 2 地铁盾构隧道渗漏水 ANP 结构模型

4.2 判断矩阵值的输入及结果

根据问卷数据及 ANP 计算软件得出二、三级指标权重(见表 2)。

4.3 各因素权重排序图

根据上述判断矩阵及各影响因子权重绘制出影响地铁车站渗漏水各因素权重排序图(见图 3)。

由计算结果可知,盾构隧道渗漏水的主要影响因素是密封垫老化(21.8%)、隧道覆水深度(16.3%)及不良的地下水环境(15.4%)。其次为管片错台(9.8%)、降雨(7.3%)及管片拼装质量(7.3%)。

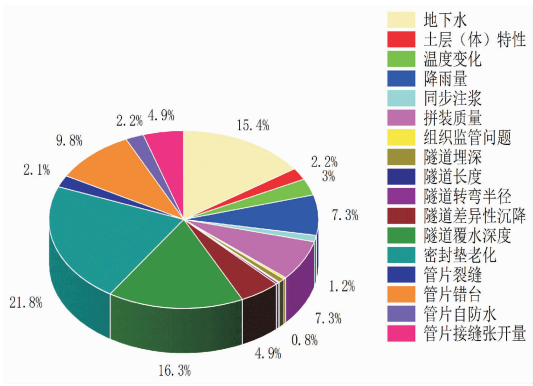


图 3 各因素权重排序图

表 2 各指标权重占比

一级 指标	二级 指标	权重 q_1	三级 指标	权重 q_2	$q_1 \times q_2$
U	U ₁	0.175	U ₁₁	0.875	0.154
			U ₁₂	0.125	0.022
	U ₂	0.103	U ₂₁	0.290	0.030
			U ₂₂	0.710	0.073
	U ₃	0.088	U ₃₁	0.133	0.012
			U ₃₂	0.831	0.073
			U ₃₃	0.036	0.003
			U ₄₁	0.035	0.008
			U ₄₂	0.007	0.002
	U ₄	0.225	U ₄₃	0.014	0.003
			U ₄₄	0.217	0.049
			U ₄₅	0.727	0.163
			U ₅₁	0.535	0.218
			U ₅₂	0.053	0.021
	U ₅	0.408	U ₅₃	0.240	0.098
			U ₅₄	0.053	0.022
			U ₅₅	0.119	0.049

4.4 盾构隧道渗漏水风险灰色综合评价模型

灰色模糊综合评价法是一种结合了灰色关联与模糊数学理论,在已知信息不充分的情况下,评价具有模糊因素的事物或现象,是要一种评价具有模糊因素事物或现象的方法。

4.4.1 构建因素集及评价集

本文以郑州地铁 1 号线燕庄站-民航路站区间为工程背景,依据地铁盾构隧道渗漏水风险影响因素分布情况建立含 5 个等级的评价集:

$Y = \{ \text{优秀, 良好, 中等, 较差, 差} \}$ (1)

目前已经基于 ANP 的方法计算了各个指标的权重 q_i ,结合隶属灰类函数,计算各评价指标 y_{ij} 的灰色权向量 q_{iju} ,即 y_{ij} 在第 u 个灰类的评价系数与整个优良评价系数总和的比值,代表 y_{ij} 属于第 u 个灰类的强烈程度,比值越大该指标在第 u 个灰类越重要。具体关系如下:

$$q_{iju} = \frac{\sum_{l=1}^m f_u(c_{ijl})}{\sum_{u=1}^5 \sum_{l=1}^m f_u(c_{ijl})}$$
 (2)

各指标在不同灰类下的灰色权向量 q_{ij} 为:

$$q_{ij} = (q_{ij1}, q_{ij2}, q_{ij3}, q_{ij4}, q_{ij5})$$
 (3)

因此,各指标 y_{ij} 对于各灰类的评价权矩阵 Q_i 如下:

$$Q_i = \begin{bmatrix} q_{i1} \\ q_{i2} \\ \vdots \\ q_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{i11} & q_{i12} & q_{i13} & q_{i14} & q_{i15} \\ q_{i21} & q_{i22} & q_{i23} & q_{i24} & q_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{ij1} & q_{ij2} & q_{ij3} & q_{ij4} & q_{ij5} \end{bmatrix}$$
 (4)

对各评价指标在一级指标进行灰色评价计算:

$$F_i = W_i \times Q_i = [f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i5}]$$
 (5)

以各一级指标 F_i 为行组成的各评价灰类的评价权矩阵 F :

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & \cdots & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & \cdots & f_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ f_{41} & f_{42} & \cdots & \cdots & f_{45} \end{bmatrix}$$
 (6)

将一级指标特征向量 W 乘以各评价灰类的评价权矩阵 F ,即可得出各灰类的综合评价 X :

$$X = W \times F = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5]$$
 (7)

然后按照计算得分的方法,得到最终评价结果。令等级分值:

$$Y = [1, 3, 5, 7, 9]^T$$
 (8)

得到最终得分:

$$Z = X * Y$$
 (9)

4.4.2 评价结果处理

由前文 ANP 的方法计算得出的权重 q_i ,给出各个层级指标的权重 W :

$$\begin{cases} W = \{0.1754, 0.1034, 0.0880, 0.2248, 0.4083\} \\ W_{U1} = \{0.8754, 0.1246\} \\ W_{U2} = \{0.2900, 0.7100\} \\ W_{U3} = \{0.1327, 0.8311, 0.0362\} \\ W_{U4} = \{0.0347, 0.0072, 0.0141, 0.2175, 0.7266\} \\ W_{U5} = \{0.5348, 0.0525, 0.2401, 0.0533, 0.1192\} \end{cases}$$
 (10)

给出评语集及对应分值为:

$$Y = \{ \text{优秀, 良好, 中等, 较差, 差} \} = \{9, 7, 5, 3, 1\}$$
 (11)

根据指标体系,渗漏水影响因素工程地质因素包括两个相关指标:地下水和土层(体)特性。给出对应的灰色模糊矩阵(见表 3)。

表 3 灰色模糊矩阵 U_1

U_1	优秀	良好	中等	较差	差
U_{11}	0.2683	0.3333	0.3029	0.0955	0.0000
U_{12}	0.1660	0.2135	0.2647	0.3131	0.0427

进行一级灰色模糊综合评价:

$$W_{U1} \times R_{U1} = [0.2556, 0.3184, 0.2981, 0.1226, 0.0053]$$
 (12)

依次计算出其余指标的灰色模糊矩阵,综合得到对应的灰色模糊矩阵 R_U (见表 4)。

表 4 灰色模糊矩阵 R

U	优秀	良好	中等	较差	差
U_1	0.2556	0.3184	0.2981	0.1226	0.0053
U_2	0.3519	0.3886	0.2404	0.0191	0.0000
U_3	0.2105	0.2691	0.3389	0.1784	0.0032
U_4	0.3484	0.3824	0.2332	0.0331	0.0029
U_5	0.2556	0.3184	0.2981	0.1226	0.0053

进行二级模糊综合评价:
 $X = W_U \times R_U = [0.2957, 0.3479, 0.2792, 0.0753, 0.0019]$ (13)

令等级分值:
 $Y = W_U[9, 7, 5, 3, 1]^T$ (14)

因此,可得到最终评价得分:
 $Z = X \times Y = 6.7206$ (15)

按照同样的方法,可以得到各指标得分依次为 6.3926, 7.1466, 6.0107, 7.0807, 6.7087。

可以判断,该区间段地铁隧道渗漏水风险评价项目的综合评价向量处于中中和良好之间,更接近于良好。

根据评价结果对该区间段渗漏水风险评价进一步分析:区间段内各风险因素评价指标均为良好,基本达到预期要求。

5 结 论

本文在现场调研与网络层次分析法与灰色模糊综合评价法的基础上,结合问卷调查建立地铁盾构隧道渗漏水风险评价指标体系和基于 ANP 的模糊综合评判模型;同时,运用该模型对郑州地铁 1 号线燕庄站-民航路站区间段工程进行风险评估。结论如下:

(1) 按照现场调研结果及网络层次法相关理论,结合地铁隧道渗漏水影响因素,以工程地质与水文地质、自然环境、施工、隧道自身、管片为一级指标构建了包括 17 个三级指标的风险评价指标体系。计算结果表明,盾构隧道渗漏水的主要影响因素是不良的地下水环境、隧道覆水深度及密封垫老化。其次为降雨、管片拼装质量及管片错台。

(2) 基于 ANP 的分析结果,构建了灰色模糊综合评判模型,应用评判模型对郑州地铁 1 号线燕庄站-民航路站区间段渗漏风险进行了评价,结果表明:该区间段内渗漏水风险评价项目的综合评价向

量为“良好”。
(3) 通过总结分析现场调研数据与 ANP 结论,揭示了盾构隧道渗漏水的易发部位以及影响渗漏的主控因素,为盾构隧道渗漏水的综合防治起到了指导作用,也为之后的地铁隧道渗漏水风险评价提供了思路。

参考文献:

[1] 葛双双,高 玮,汪义伟,等.我国交通盾构隧道病害、评价及治理研究综述[J]. 土木工程学报,2023,56(1):119-128.

[2] 江时雨,陈建宏,李 涛,等.水下隧道涌水灾害风险评价与预测[J]. 中国安全科学学报,2013,23(12):101-106.

[3] 潘海泽.隧道工程地下水水害防治与评价体系研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.

[4] 潘海泽,黄 涛,杨海静,等.铁路运营隧道渗漏水灾害成因分析及评价指标体系建立[J]. 工程勘察,2008(12):21-25.

[5] 李 鑫.公路隧道渗漏水病害检测及评价体系研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.

[6] 魏荣誉.离军高速离石黄土隧道渗漏水机理与防治技术初步研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.

[7] 刘志祥.运营隧道结构渗漏规律及其影响评估[D]. 南京:东南大学,2020.

[8] 陈 君.地铁盾构隧道结构安全评估方法研究[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(S1):52-56.

[9] 石建勋,刘新荣,曹万智,等.改进的 AHP 对连拱隧道渗漏水病害影响因素评价[J]. 地球物理学进展,2013,28(1):482-487.

[10] 陈梦捷,潘海泽,贺 建,等.模糊熵理论在地铁隧道渗漏水中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S1):62-65.

[11] Nabeel Ahma.基于模糊层次分析法的隧道突水风险评估[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.

[12] 吴贤国,张文静,张立茂,等.相依性条件下滨海软土隧道盾构施工渗漏水风险评价[J]. 铁道标准设计,2019,63(1):103-110.

[13] 刘德军,仲 飞,黄宏伟,等.运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报,2021,34(11):178-199.

[14] 周彩荣.武汉某地铁盾构隧道运营期常见病害原因分析及治理措施[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(12):153-157.

[15] 张文静.盾构隧道运营期渗漏水风险评价与管理[D]. 武汉:华中科技大学,2019.