

隧道施工引起的地下水环境负效应评价体系研究

万炳彤, 鲍学英, 李爱春

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了量化隧道施工引起的地下水环境负效应, 构建一套科学完善的隧道工程地下水环境负效应评价体系。根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB/10049-2014) 及相关文献, 建立隧道工程地下水环境负效应评价的层次模型, 考虑到隧道工程地下水环境负效应评价中信息的不确定性、未确知性, 建立评价指标与地下水环境负效应间的未确知测度模型, 结合 AHP 法求出的各指标权重, 求出多指标加权综合测度, 从而得出基于未确知测度理论的评价模型。最后利用某工程实例对该评价体系加以验证, 并将评价结果同模糊综合评价法的评价结果进行比较, 验证了该评价体系的可靠适用性。

关键词: 隧道施工; 地下水环境; 负效应; 未确知测度; 评价体系

中图分类号: U452; P642.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)05-0058-06

Study on the evaluation system of negative effect of groundwater environment caused by tunnel construction

WAN Bingtong, BAO Xueming, LI Aichun

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to quantitatively reflect the impact of tunnel engineering on groundwater environment, a set of scientific and perfect evaluation system of negative effect of groundwater environment in tunnel engineering was constructed. According to Hydrogeological Survey of Railway Engineering (TB/10049-2014) and the related literatures, we established a hierarchy of tunnel project of groundwater environment negative effect evaluation model. By considering the uncertainty and unascertainty of the tunnel project of groundwater environment effect evaluation in the information, establishing evaluation index and the effect of groundwater environments, combining the unascertained measure model with AHP method to calculate the index weight, and calculating the multi-target weighted comprehensive measures, this study obtained the evaluation model based on the unascertained measure theory. Finally, an engineering example was used to verify the evaluation system, and the evaluation results were compared with the results of fuzzy comprehensive evaluation method to verify the reliability and applicability of the evaluation system.

Key words: tunnel construction; ground water environment; negative effect; unascertained measure; evaluation system

1 研究背景

环境效应特指由于人为活动或自然过程而引发环境系统结构和功能改变的一种环境效果。环境负效应即指对环境造成的不良效果^[1]。隧道开挖会破坏隧址区原有的地下水循环系统, 造成一系列的地下水环境负效应, 主要表现为以下几个方面: 出现

隧道内涌水, 造成地下水位下降, 水资源流失; 疏干漏斗扩大, 造成洞顶地表水资源的涸竭、地表塌陷等灾害; 出现土壤缺水情况, 造成植被无法正常生长, 破坏生态环境^[1-3], 其影响机理如图 1 所示。目前, 已有不少学者在关于隧道建设对地下水环境产生的负效应方面进行了一些研究^[1-4]。但是, 现有的研究多见于分析隧道施工对地下水环境产生负效应的

收稿日期: 2019-01-13; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768034)

作者简介: 万炳彤(1992-), 女, 甘肃定西人, 博士研究生, 主要从事水环境、水质评价等方面的研究。

通讯作者: 鲍学英(1974-), 女, 宁夏中卫人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事绿色铁路及工程管理方面的研究。

成因、表现形式与对应的的控制措施上,而对产生负效应的程度等级方面的评价研究却为数不多。隧道工程地下水环境负效应评价体系研究作为隧道工程地下水环境负效应方向的重要分支,不仅能够量化对水环境的影响程度,为隧道工程的生态环境负效应评价提供理论基础,同时也为隧道工程选址优化、隧道安全施工、隧道区域生态修复工作提供理论参考^[1]。目前,现有的主要研究成果有:刘建^[5]以垫邻高速铜锣山隧道为例,构建了基于地下水补给源—径流途径—隧道受体为框架的指标体系,并利用模糊评价模型对其进行了综合评价。白明洲等^[6]认为隧道涌水是造成地下水环境负效应的主要原因,故考虑了诱发隧道涌水的各项因素,建立了隧道工程地下水环境负效应评价的层次模型,同样应用模糊数学方法进行了综合评价。上述研究在隧道施工引起的地下水环境负效应评价方面均发挥了重要作用,但在科学合理地解决这类问题上均存在一定的局限性。例如刘建^[5]在充分考虑诱发隧道涌水因素的基础上,从自然地理、水文地质、隧道工程 3 个方面出发,构建了一套科学完善的隧道工程地下水环境负效应评价体系,具体指标多达 19 个,并应用了模糊综合评价法进行了评价分析。但该模型存在固有缺陷,即因数集(指标个数)较大时,相对隶属度权系数变小(权向量和为 1),出现权向量和模糊矩阵不匹配的现象,从而引发超模糊现象,难以识别各等级的隶属度高低,影响评价效果^[7]。故该模型在评价隧道施工引起的地下水环境负效应时缺乏合理性。白明洲等^[6]在构建层次模型时,仅考虑了自然地理与水文地质因素,忽略了隧道施工因素与地下水环境的相关性,构建的评价体系缺乏科学完善性。隧道建设时影响地下水环境的因素复杂多变,具有不确定性,很难用简易的方法对隧道工程地下水环境负效应进行量化评价,且隧道建设时影响地下水环境的因素例如地表汇水面积、多年平均蒸发量、可溶岩出露面积比率等指标信息无法避免的会出现实测资料不完全、测量值不精确等原因所导致的不确定性,这种纯主观认知上的不确定性称为未确知性。

未确知测度模型是一种适用于大数据集的不确定性分析方法,能够解决隧道施工引起的地下水环境负效应评价中诸多因素的未确知性,还能对其进行定量分析。基于此,本文根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB/10049-2014)中的 8.24 节及其他相关文献,建立了一套科学完善的评价体系,并建

立各项指标与地下水环境负效应间的未确知测度模型,应用 AHP 法求出各指标权重,获得多指标加权综合测度,从而得出基于未确知测度理论的评价模型(具体过程如图 2 所示)。最后利用某工程实例对该模型加以验证。

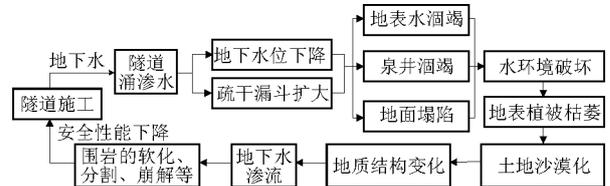


图 1 隧道施工对地下水环境的影响机理

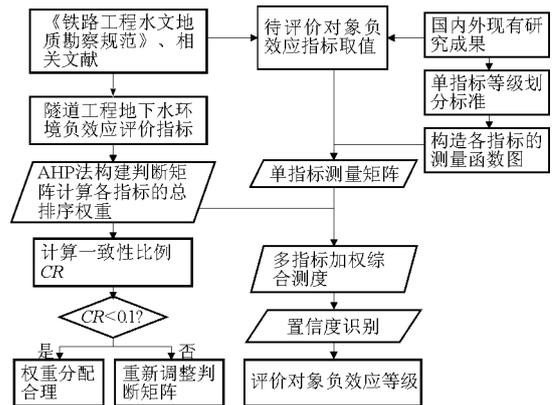


图 2 基于未确知测度理论的评价模型

2 未知测度评价模型

设 O_1, O_2, \dots, O_n 代表 n 个待评价地下水环境负效应的隧道工程,其构成的集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 称作评价对象空间,任取 $O_i \in O (i = 1, 2, \dots, n)$ 都有 m 个评价指标 S_1, S_2, \dots, S_m ,其构成的集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 称为评测空间, $x_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 个隧道工程 O_i 关于评价指标 S_j 的实测值。对于每个实测值 x_{ij} 都划分成 q 个负效应等级 C_1, C_2, \dots, C_q ,其构成的集合 $E = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$ 称作评价空间。其中 C_k 代表隧道工程地下水环境的第 k 个负效应等级,且 k 级负效应弱于 $k + 1$ 级,即 $C_k > C_{k+1}$ ^[8]。

2.1 单指标测度

若 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 代表实测值 x_{ij} 隶属于第 k 个负效应等级 C_k 的范围,且满足:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in E) = 1 \quad (2)$$

$$\mu[x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l] = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \quad (3)$$

则称 μ 为未确知测度^[9-11], $(\mu_{ijk})_{m \times q}$ 称作评价对

象 O_i 的单指标测度评价矩阵,表示为:

$$(\mu_{ijk})_{m \times q} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1q} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用最常用的直线型测度函数^[12],如公式(5)所示,计算各评价对象的单指标测度评价矩阵。

$$\begin{cases} \mu_{ijk} = \mu_k(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{-x_{ij}}{d_{k+1} - d_k} + \frac{d_{k+1}}{d_{k+1} - d_k} & (d_k < x_{ij} \leq d_{k+1}) \\ 0 & (x_{ij} > d_{k+1}) \end{cases} \\ \mu_{ij(k+1)} = \mu_{j(k+1)}(x_{ij}) = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq d_k) \\ \frac{x_{ij}}{d_{k+1} - d_k} - \frac{d_k}{d_{k+1} - d_k} & (d_k < x_{ij} \leq d_{k+1}) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: d_k 为评价对象实测值区间上分布的点,设第 k 个负效应等级的取值区间为 $[d_{k-1}, d_k]$,实测值从 d_k 升高到 d_{k+1} 时,对于第 k 个负效应等级的隶属度慢慢减少,至 d_{k+1} 时,降为 0,相应的对第 $k+1$ 个负效应等级的隶属度由 0 增加到 1。

2.2 多指加权综合测度

鉴于指标权重向量在未确知测度模型计算中具有非常关键的作用,且常用的客观赋权法例如熵权法、相似系数法等权重向量取决于评价对象其观测值的数据特征,观测值不同,求得的权重向量就不同,对于未确知测度模型计算缺乏科学合理性,故采用 AHP 主观赋权法^[13]建立隧道工程地下水环境负效应多层次评价指标体系层间的判断矩阵,求出每个评价指标的权重向量 $W = w_j (j = 1, 2, \dots, m)$,且一致性检验合格。若 $\mu_k^i = \mu(O_i \in C_k)$ 代表评价对象 O_i 属于第 k 个负效应等级 C_k 的程度,则:

$$\mu_k^i = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad (6)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, q)$

此时 $\{\mu_1^i, \mu_2^i, \dots, \mu_q^i\}$ 称作评价对象 O_i 的多指标加权综合测度评价向量^[14]。

2.3 置信度识别

评价空间 E 的等级划分是有序的,故适用于置信度识别准则^[14]:设有置信度 λ , O_i 属于 C_l 类的隶属度为 μ_l^i ,满足 $\sum_{l=1}^m \mu_l^i = 1$ 。若在 $C_1 > C_2 > \dots > C_q$ 时满足:

$$k_r = \min\{k: \sum_{l=1}^m \mu_l^i \geq \lambda, (k = 1, 2, \dots, q)\} \quad (7)$$

则第 i 个隧道工程 O_i 施工引起的地下水环境负效应属于 C_{k_r} 等级。上述准则认为“负效应低”的类应占相当大的比例。实际应用中置信度取 0.6 ~ 0.7 之间^[14],本文取 $\lambda = 0.6$ 。

2.4 排序

得知各隧道工程的负效应等级后,还可以对其负效应程度进行排序,从而使评价结果更加直观,便于针对性地对隧道区段施行相应的优化措施。已知 $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_q$,取 $C_k (k = 1, 2, \dots, q)$ 的分值为 I_k ,则 $I_k > I_{k+1}$ 。且

$$d_{o_i} = \sum_{k=1}^q I_k \mu_k^i \quad (8)$$

式中: d_{o_i} 称为评价对象 O_i 的未确知重要度,其构成的集合 $d = \{d_{o_1}, d_{o_2}, \dots, d_{o_n}\}$ 称为未确知重要度向量^[14]。根据各隧道工程的未确知重要度大小即可获知其最终的地下水环境负效应程度排序。

3 评价指标体系与分级标准

3.1 评价指标体系的构建

根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB/10049-2014)8.24 节及参考文献^[15],在充分考虑诱发隧道涌水因素的基础上,从地质-水文地质、自然地理、隧道工程 3 个方面出发构建评价指标体系,并将各指标运用 Delphi 法进行筛选,最终筛选出洞顶水头压力等 19 个具体指标,构建出隧道工程地下水环境负效应评价指标体系如图 3 所示。

3.2 地下水环境负效应分级标准

分级标准参照国内外现有研究成果^[15-18]常用的地下水环境负效应划分标准,将评价对象关于各评价指标的实测值 x_{ij} 划分为 5 个负效应等级,即 $E = \{C_1, C_2, \dots, C_5\}$, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 依次对应:很弱(I)、较弱(II)、中等(III)、较强(IV)、很强(V),具体分级标准如表 1 所示(注:岩层富水性 S_3 按补给模数 (M) 划分^[5])。各负效应等级对应的表现形式如表 2 所示。

4 实证研究

以重庆市渝怀铁路歌乐山隧道为例^[15],该隧道全长 4 050m,对应里程 DK1+560 ~ DK5+610。最大洞高 7.25 m,洞顶最大埋深 28 m。隧址区气候属于亚热带季风湿润气候,多年平均降雨量为 1 082 mm,多年平均蒸发量为 766.2mm,根据该隧道工程相关设计参数,结合隧址区地质-水文地质情况、自然地理情况、现场调查情况,按图 3 获得该工程各项指标的实测值如表 3 所示。

根据表 1 与公式(5),分别构建各负效应评价指标的测度函数图如图 4 所示(其中定性指标 I 级取 9 分,II 级取 7 分, III 级取 5 分,IV 级取 3 分,V 级取 1 分)。

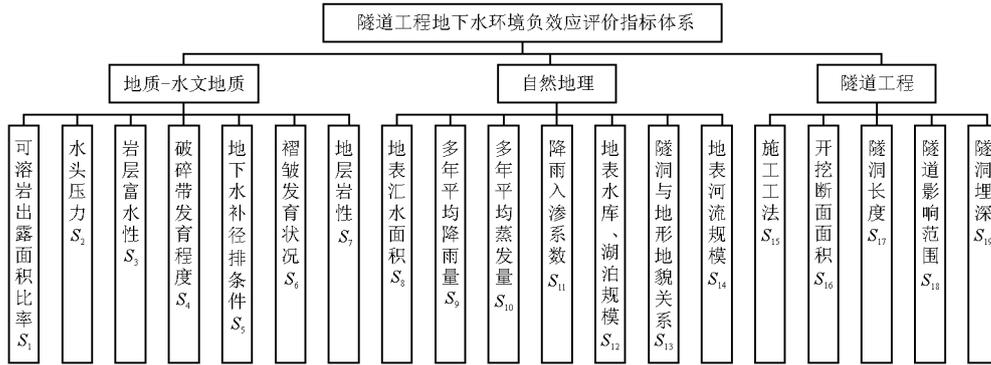


图 3 隧道工程地下水环境负效应评价指标体系

表 1 地下水环境负效应各评价指标等级划分标准

评价指标	地下水环境负效应等级				
	I	II	III	IV	V
$S_1 / \%$	<30	30 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 90	>90
S_2 / MPa	<0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 3.0	3.0 ~ 5.0	>5.0
$S_3 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$	<5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	>20
S_4	不发育	较差	一般	较发育	发育
S_5	补给区	弱补给区	弱径流区	强径流区	排泄区
S_6	无褶皱	平缓褶皱	裂隙较发育的褶皱	裂隙发育的褶皱	断层发育的褶皱
S_7	泥岩、黏土岩	砂岩、细砂岩	花岗岩、火成岩	风化变质岩	石灰岩等可溶岩
S_8 / km^2	<10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	>80
S_9 / mm	<600	600 ~ 800	800 ~ 1000	1000 ~ 1600	>1600
S_{10} / mm	>800	600 ~ 800	500 ~ 600	400 ~ 500	<400
S_{11}	<0.05	0.05 ~ 0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	>0.50
$S_{12} / 10^4 \text{ m}^3$	<50	50 ~ 100	100 ~ 500	500 ~ 1000	>1000
S_{13}	平坦	单斜面型	山谷侧下方平行型	横贯河流型	山谷正下方平行型
$S_{14} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	<0.1	0.1 ~ 0.5	0.5 ~ 2.0	2.0 ~ 10.0	>10.0
S_{15}	TBM 法	新奥法	钻爆法分部开挖	钻爆法台阶法	钻爆法全断面
S_{16} / m^2	<50	50 ~ 120	120 ~ 250	250 ~ 350	>350
S_{17} / km	<0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 1.0	1.0 ~ 3.0	>3.0
S_{18} / km	<0.4	0.4 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	>3.0
S_{19} / m	<100	100 ~ 300	300 ~ 500	500 ~ 1000	>1000

表 2 地下水环境各负效应等级的表现形式

负效应等级	负效应表现形式
I	隧道内出水量 < 1000 m ³ /d, 地下水位无明显下降, 不影响地表植被正常生长。
II	1000 m ³ /d < 隧道内出水量 ≤ 3000 m ³ /d, 疏干漏斗扩大, 地下水位在一定范围内出现下降现象, 对地表植被生长造成轻微影响。
III	3000 m ³ /d < 隧道内出水量 ≤ 8000 m ³ /d, 涌水较明显, 疏干漏斗扩大, 地下水位在较大范围内出现下降现象, 局部地表塌陷、水资源流失, 对地表植被生长造成一定影响。
IV	8000 m ³ /d < 隧道内出水量 ≤ 20000 m ³ /d, 涌水明显, 疏干漏斗扩大, 区域内地下水位出现较明显下降, 较大范围内地表塌陷、水资源流失, 对地表植被生长造成较大影响。
V	隧道内出水量 > 20000 m ³ /d, 大量涌水, 疏干漏斗扩大, 区域内地下水位出现明显下降, 大范围内地表塌陷、水资源流失, 地表植被干枯。

表3 各项评价指标的实测值

$S_1 /$ %	$S_2 /$ MPa	$S_3 /$ $10^4(m^3 \cdot a^{-1} \cdot km^{-2})$	S_4	S_5	S_6	S_7	$S_8 /$ km^2	$S_9 /$ mm	$S_{10} /$ mm
40	0.7	18	较发育	强径流区	裂隙发育褶皱	火成岩	40	1082	766.2
S_{11}	$S_{12} /$ $10^4 m^3$	S_{13}	$S_{14} /$ $(m^3 \cdot s^{-1})$	S_{15}	$S_{16} /$ m^2	$S_{17} /$ km	$S_{18} /$ km	$S_{19} /$ m	
0.18	160	河流型	<0.1	全断面法	45	0.405	1.02	230	

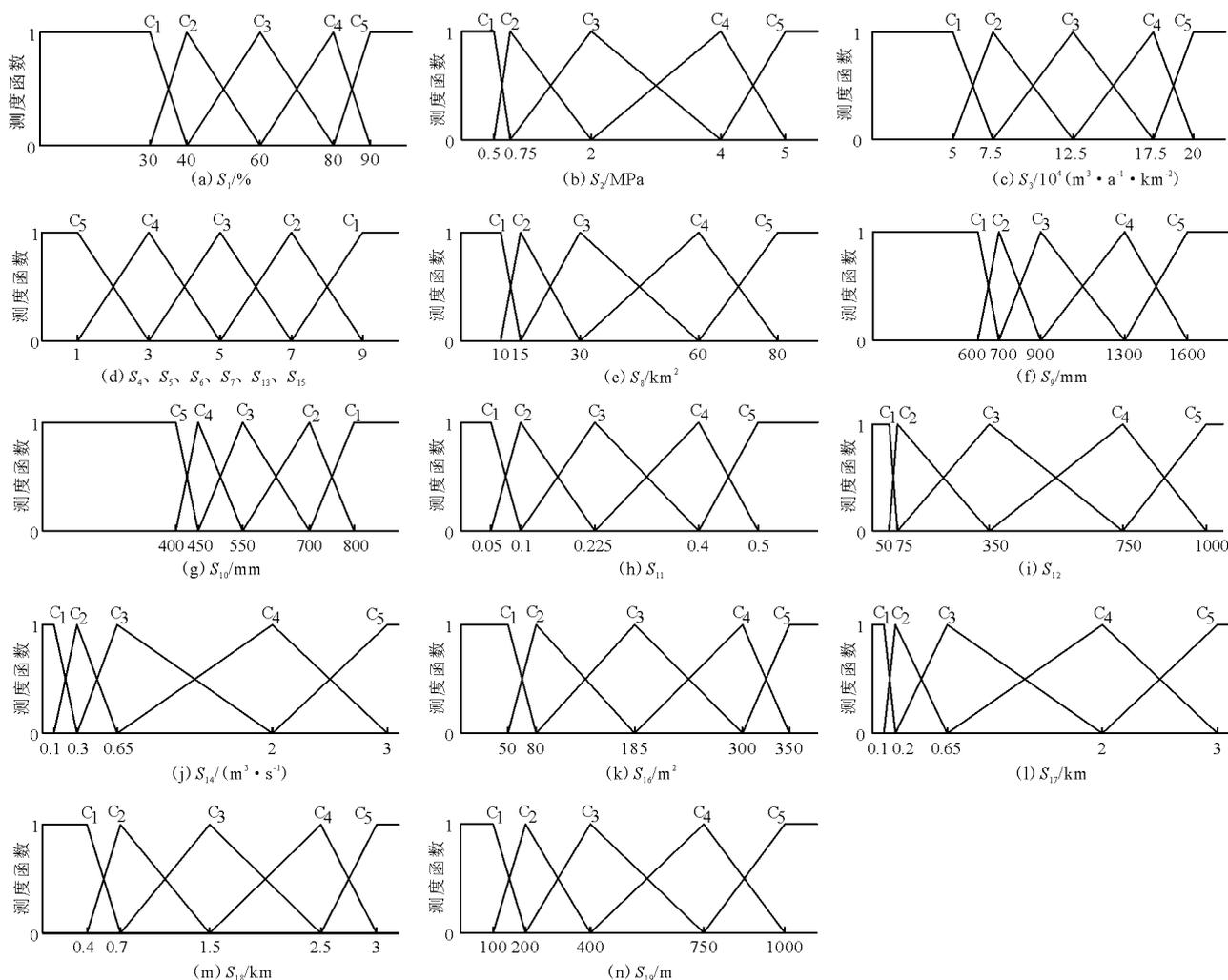


图4 各项负效应评价指标的测度函数图

表4 各项负效应指标的总排序权重

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
0.0679	0.0393	0.0705	0.0834	0.0681	0.0617	0.0781	0.0387	0.0535	0.0251
S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}	S_{19}	
0.0386	0.0419	0.0539	0.0419	0.0477	0.0362	0.0554	0.0538	0.0445	

将表3中地下水环境负效应评价的各项指标取值分别代入图4所对应的各负效应指标的测度函数

图中,得到渝怀铁路歌乐山隧道工程的单指标测度矩阵 μ_{1jk} 如下:

$$\mu_{ijk} = \begin{bmatrix} 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.20 & 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.80 & 0.20 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.67 & 0.33 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.54 & 0.46 & 0.00 \\ 0.66 & 0.34 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.36 & 0.64 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.62 & 0.38 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.60 & 0.40 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.85 & 0.15 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

文献[15]根据隧道工程地下水环境负效应评价指标体系(图3),利用AHP法和10位地质-水文地质、自然地理、隧道工程等领域的专家打分构建出多层次评价模型层间的判断矩阵。获得各负效应指标的总排序权重如表4所示。

根据公式(6),用指标权重 W 乘以矩阵 μ_{ijk} 可求出该隧道工程的加权综合测度评价向量 $\mu_k^1 = [0.103, 0.258, 0.224, 0.361, 0.062]$ 。根据本文2.3节描述的置信度识别准则,取置信度 $\lambda = 0.6$,通过加权综合测度评价向量 μ_k^1 与公式(7)可得 $k_r = 4$,对应IV级,即该隧道工程引起的地下水环境负效较强。并将计算结果与文献[15]采用的模糊综合评价法进行比较,如表5所示。由表5可以看出基于未确知测度理论的评价结果同使用模糊评价法的评价结果基本相同,且文献[15]通过现场调查已验证歌乐山隧道建设引起的地下水环境负效应评价等级为IV级的结论与实际情况相同,证明本文所选用的方法能够为科学合理的评价类似隧道工程引起的地下水环境负效应提供参考。

表5 渝怀铁路歌乐山隧道工程地下水环境负效应评价结果

评价方法	负效应等级					所属等级
	I	II	III	IV	V	
模糊综合评价法(模糊向量)	0.189	0.215	0.192	0.301	0.103	IV(较强)
本文方法(综合测度评价向量)	0.103	0.258	0.224	0.361	0.062	IV(较强)

5 结 论

(1) 本文根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB/10049-2014)及相关文献,在充分考虑诱发隧道涌水因素的基础上,从地质-水文地质、自然地理、隧道工程3个方面出发建立了隧道工程地下水环境负效应评价的层次模型。

(2) 考虑到隧道工程地下水环境负效应评价中信息的不确定性和未确知性,建立评价指标与地下水环境负效应间的未确知测度模型,结合AHP法求出的各指标权重,得到多指标加权综合测度,从而得出基于未确知测度理论的评价模型。

(3) 利用本文所构建的评价体系对渝怀铁路歌乐山隧道某区段引起的地下水环境负效应进行了评价,其结果为IV级,即该区段隧道工程引起的地下水环境负效较强。且评价结果同模糊综合评价法求出的负效应等级一致,验证了本文所构建评价模型的可靠适用性。

参考文献:

- [1] 张国珍,崔圣达,张洪伟,等. 隧道工程对生态环境的影响及环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(4): 53-57.
- [2] 杜欣,曾亚武,岳全贵. 铁路隧道建设与水环境关系分析[J]. 铁道工程学报, 2009(1): 82-85+110.
- [3] 索巍,胡伟宾. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 科技视界, 2015(3): 108+182.
- [4] 赖明. 叙岭关隧道建设对地下水环境的影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [5] 刘建. 岩溶隧道地下水环境负效应评价体系研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [6] 白明洲,陈云,师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评价[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 5-10+15.
- [7] 章华东,史修松. 模糊综合评判改进模型在产品评估中的应用[J]. 淮阴工学院学报, 2016, 25(5): 85-88.

(下转第71页)

- [3] SINGH K P, BASANT A, MALIK A, et al. Artificial neural network modeling of the river water quality: a case study [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(6):888-895.
- [4] KOKLU R, SENGORUR B, TOPAL B. Water quality assessment using multivariate statistical methods: a case study: Melen River System (Turkey) [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(5):959-978.
- [5] TABATA T, HIRAMATSU K, HARADA M. Assessment of the water quality in the Ariake sea using principal component analysis [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7(1):41-49.
- [6] 王彦丽,赵敏宇. 近10年辽河干流水质综合评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(5):53-59.
- [7] 祁艳丽,唐永杰,蔡树伯,等. 淡水湖泊沉积物污染评价方法比较——以北大港水库为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6):26-30+38.
- [8] 刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,等. 国外地表水水质指数评价方法综述[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1):86-90+96.
- [9] 张旋,王启山,于森,等. 基于聚类分析和水质标识指数的水质评价方法[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(2):476-480.
- [10] 初海波,卢文喜,尹津航,等. BP网络、Hopfield网络在水质评价应用中的比较研究[J]. *中国农村水利水电*, 2011(10):70-72.
- [11] 李清芳,姚靖,黄晓容,等. 多元统计分析在典型湖库型饮用水水源地水质评价中的应用[J]. *环境影响评价*, 2016, 38(6):73-79.
- [12] 高红杰,郑利杰,嵇晓燕,等. 典型城市地表水质综合评价方法研究[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(2):55-60.
- [13] 杨永宇,尹亮,刘畅,等. 基于灰关联和BP神经网络法评价黑河流域水质[J]. *人民黄河*, 2017, 39(6):58-62.
- [14] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB 3838-2002 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 查木哈,卢志宏,翟继武,等. 双隐含层BP神经网络模型在老哈河水质预测中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2):56-61.
- [16] 程学宁,汤云,卢毅敏. 基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6):89-94.
- [17] 中华人民共和国水利部. 地表水资源质量评价技术规程:SL 395-2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [18] 陈海生,严力蛟. 浙江省长潭水库溶解氧变化特性及其与水温相关性[J]. *科技通报*, 2015, 31(3):249-253.
- [19] 吴雅丽,许海,杨桂军,等. 太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(9):1622-1629.
- [20] LIU Xia, LU Xiaohua, CHEN Yuwei. The effects of temperature and nutrient ratios on Microcystis blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation [J]. *Harmful Algae*, 2011, 10(3):337-343.
- [21] 刘娟,王飞,韩文辉,等. 汾河上中游流域生态系统健康评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3):91-98.
- [22] 王伟,顾继光,韩博平. 华南沿海地区小型水库叶绿素a浓度的影响因子分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(1):64-71.
- [23] 毕京博,郑俊,沈玉凤,等. 南太湖入湖口叶绿素a时空变化及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(6):7-13.
- [24] 张文涛. 大沙河水库富营养化限制性因子分析[J]. *广东水利水电*, 2009(9):26-28+42.

(上接第63页)

- [8] 李树刚,马超,王国旗. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(2):101-103.
- [9] 刘志祥,郭永乐,周士霖. 隧道下穿桥梁的桥墩稳定性未确知测度评价研究[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(4):91-97.
- [10] 陈顺满,许梦国,王平,等. 基于未确知测度理论的地下金属矿山合理产能优选[J]. *武汉科技大学学报*, 2013, 36(6):461-464.
- [11] 曾佳龙,黄锐,关燕鹤,等. 熵权-未确知测度理论在尾矿库安全标准化中的应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(2):160-166.
- [12] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等. 基于未确知测度理论的排土场滑坡风险评价模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(5):1612-1617.
- [13] 梁力,季贵斌,赵颖. 高速公路边坡暖季型草本植物生态适应性评价[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1):128-132.
- [14] 王凤菲,王恩茂,徐同启. 基于组合赋权-未确知测度理论的地铁隧道围岩质量评价[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(6):129-134.
- [15] 刘建,刘丹,宋凯. 渝怀铁路歌乐山隧道排水的地下水环境负效应评价[J]. *现代隧道技术*, 2012, 49(4):184-189.
- [16] 汪亚莉,许模,张强,等. 云南洱海东侧引水隧道地下水环境负效应探讨[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(2):14-18.
- [17] 刘建,刘丹. 岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究——以铜锣山隧道为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3):268-271.
- [18] 刘志春,王梦恕. 石板山隧道与地下水环境相互作用评价技术研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(S1):321-325.