

基于直觉模糊 TOPSIS 耦合法的隧道地下水环境负效应评价研究

贺振霞, 鲍学英

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探究隧道施工对地下水环境的负面影响,依据相关规范以及参考文献,在考虑地下水环境复杂性和不确定性的基础上,构建了一套隧道地下水环境负效应评价体系。首先基于“压力-状态-响应”(PSR)模式和全过程管理的思想,构建了隧道地下水环境负效应评价指标体系。然后利用层次分析法(AHP)和直觉模糊熵(IFE)确定各评价指标的组合权重,建立了改进的直觉模糊集和逼近理想解排序法(TOPSIS)耦合模型来计算隧道地下水环境负效应的等级。最后根据某工程实例对该评价模型进行验证,并与文献中不同模型的评价结果进行比较,验证了该模型的可靠性和优越性。

关键词: 隧道施工;地下水负效应;直觉模糊集;TOPSIS法;耦合

中图分类号:TV211.1⁺2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)06-0088-07

Negative effect evaluation of tunnel groundwater environment based on the coupling method of intuitionistic fuzzy set and TOPSIS

HE Zhenxia, BAO Xueying

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

Abstract: In order to explore the negative impact of tunnel construction on the groundwater environment, a negative effect evaluation system of tunnel groundwater was constructed according to the relevant specifications and references with the consideration of the complexity and uncertainty of groundwater environment. Firstly, the evaluation index system of negative effect of tunnel groundwater was established based on the pressure-state-response (PSR) model and the idea of whole process management. Then, the combined weight of each evaluation index was determined using analytic hierarchy process (AHP) and intuitive fuzzy entropy (IFE), and the coupling model of improved intuitionistic fuzzy set and technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) was established to calculate the negative effect level of tunnel groundwater. Finally, the evaluation model was verified with an engineering case. Compared with the evaluation results of different models in literature, the reliability and superiority of the model were verified.

Key words: tunnel construction; groundwater negative effect; intuitionistic fuzzy set; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS); coupling

1 研究背景

环境效应是指在诸多环境因素复合影响的情况下,各物质之间通过物理、化学、生物作用带来的环境效果。地下水环境负效应是指由于地下水资源、矿产资源开发或隧道施工排放地下水等原因造成的

有害的或者是弊大于利的环境效应。隧道地下水环境负效应主要体现在隧道的涌突水、区域的地下水位下降、地面沉降和坍塌、地下水污染和地表水枯竭等方面^[1]。其中,隧道施工引起的地下水涌水问题切实影响着地下水环境的变化,是长期以来难以突破的水文地质难题^[2]。若地下水环境遭到破坏,最

收稿日期:2020-04-07; 修回日期:2020-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51768034)

作者简介:贺振霞(1996-),女,山西朔州人,硕士研究生,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。

终会导致地下水环境及地表生态恶化,从而影响居民的生活和生产用水^[3]。因此对隧道施工引起的地下水环境负效应的研究非常必要。

在水环境效应研究方面,学者们^[4-7]主要集中在研究水库、河流等地表水,针对隧道施工地下水方面的研究较少。对于隧道建设引起的地下水环境问题,很多学者^[8-12]的关注点在于研究隧道施工出现涌水的原因和涌水量预测以及对水环境的扰动、预防措施和水质评价等,在隧道施工对地下水环境负效应评价方面的研究较少。而在现有的隧道地下水负效应等级评价研究中,学者们主要采用层次分析法、专家打分法、G1 法等^[12-15]主观赋权法确定各个指标的权重,由于不同专家对问题的认知有所不同,所以主观随意性较大;在等级评价模型的研究中,目前学者们主要采用未知测度模型、模糊综合评价等评价模型进行研究^[12-15]。未知测度模型考虑了地下水环境的未知性和不确定性,但是只考虑到评价指标的实测值在相邻等级的隶属度,却没有考虑到在其他等级中的隶属度和非隶属度的偏差;模糊综合评价法可以有效地处理模糊的评价对象,作出合理、贴近实际的量化评价,但是确定指标权重的主观性较大。

基于上述研究内容的不足,本文提出采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与直觉模

糊熵(intuitive fuzzy entropy, IFE)确定各评价指标的组合权重,采用直觉模糊集与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)耦合模型构建隧道地下水负效应评价模型,既克服了主观随意性,又克服了客观赋权法的绝对客观性,同时本文使用直觉模糊熵不但考虑了隶属度和非隶属度的偏差,而且考虑了犹豫度对熵值的影响,能够更加合理地刻画直觉模糊集的模糊程度。

2 构建评价指标体系与指标等级划分标准

本文根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB 10049-2014) 8.24 节以及参考文献[14],基于“压力-状态-响应”(pressure-state-response, PSR)模式和全过程管理的思想,从地质-水文地质、自然地理以及隧道工程 3 个方面建立了隧道地下水负效应评价指标初选体系。经过 Delphi 法的筛选与优化,选择 19 个评价指标构建隧道地下水负效应评价体系,如图 1 所示。参照国内外现有的地下水负效应评价等级研究成果^[12-15],确定了各评价指标等级划分标准,共划分为 5 个效应等级即 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_5\}$, 分别对应很弱(I)、较弱(II)、中等(III)、较强(IV)、很强(V)。

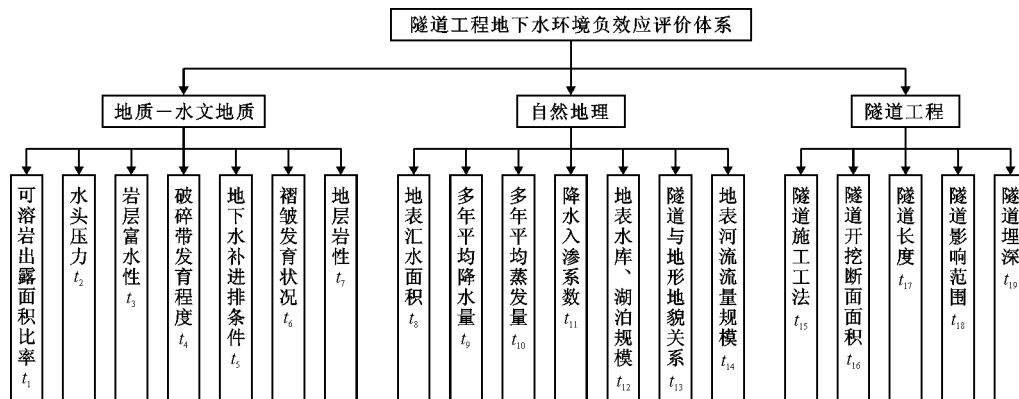


图 1 隧道工程地下水环境负效应评价体系

3 建立改进的直觉模糊集与 TOPSIS 耦合的评价模型

3.1 评价指标权重的确定

本文充分考虑了主观权重与客观权重的优缺点,运用直觉模糊理论的思想来确定组合权重。各指标主观权重选用 AHP 法获取,客观权重选用直觉模糊熵(IFE)^[16]得到。

3.1.1 IFE 客观权重确定方法基本步骤

第 1 步:计算 p 个地下水负效应等级中第 i 个指标的 IFE 值。

$$E_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \cos \frac{\mu_{ij}^2 - \nu_{ij}^2}{2} \pi_{A(j)} \quad (1)$$

式中: E_i 为各指标的 IFE 值; μ_{ij} 和 ν_{ij} 分别为指标 t_i 在负效应等级 s_j 的隶属度和非隶属度; i 为指标数且 $i \in [1, 2, \dots, q]$; j 为负效应等级数且 $j \in [1, 2,$

..., p]; $\pi_{A(s_j)}$ 为指标 t_i 在负效应等级 s_j 中的模糊犹豫度。

第2步:计算各指标的熵权 ζ_i 。

$$\zeta_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^q (1 - E_i)} \quad (2)$$

3.1.2 评价指标组合权重的确定 根据计算得出评价指标的主观权重表示为 $\alpha = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_i, \dots, \vartheta_q]$, 客观权重表示为 $\beta = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_i, \dots, \zeta_q]$ 。由于乘法集成法适合于权重较多、分配较均匀的组合同权重, 则基于直觉模糊集表达的组合同权重为:

$$\omega_q = \langle \alpha_q, \beta_q \rangle = \left\langle \frac{\vartheta_i \zeta_i}{\sum_{i=1}^q \vartheta_i \zeta_i}, \frac{(1 - \vartheta_i)(1 - \zeta_i)}{\sum_{i=1}^q (1 - \vartheta_i)(1 - \zeta_i)} \right\rangle \quad (3)$$

式中: ϑ_i 和 ζ_i 分别为各指标隶属度模型中的主客观权重和客观权重; $i \in [1, 2, \dots, q]$ 。

3.2 直觉模糊集与 TOPSIS 耦合模型的构建

3.2.1 直觉模糊集基本理论 设 X 为给定的集合, 若 $0 \leq \mu_A(x) \leq 1, 0 \leq \nu_A(x) \leq 1$ 且 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$, 则称 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in X \}$ 为 X 上的直觉模糊集。其中, μ_A 和 ν_A 分别为元素 x 属于 A 的隶属度和非隶属度。称 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 为元素 x 在 A 中的犹豫度^[17-20]。

若直觉模糊集 $A = \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle$, 直觉模糊集 $B = \langle x, \mu_B(x), \nu_B(x) \rangle$, 则两个模糊集的积运算为:

$$AB = \{ \langle x, \mu_A(x)\mu_B(x), \nu_A(x) + \nu_B(x) - \nu_A(x)\nu_B(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (4)$$

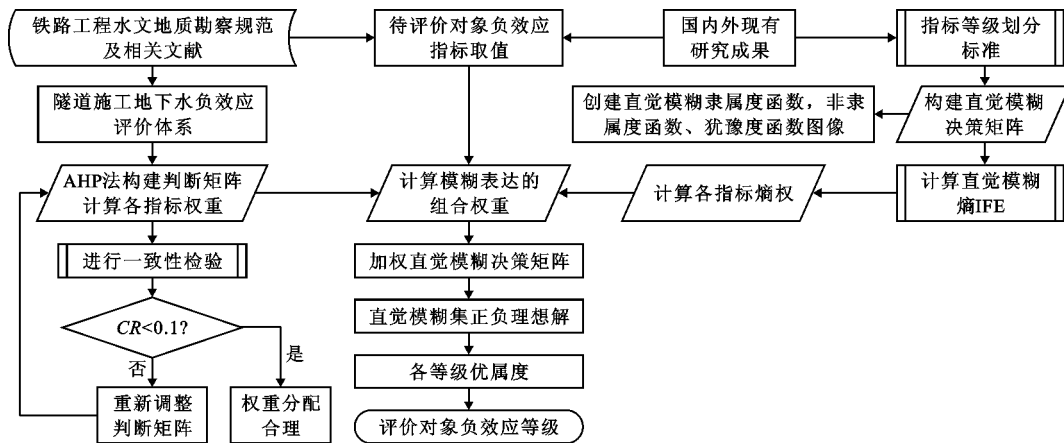


图2 基于直觉模糊集与 TOPSIS 耦合的评价模型构建与计算流程

3.2.2 基本评价模型的构建 基于直觉模糊集与 TOPSIS 耦合的评价模型构建与计算流程如图2所示, 详细流程如下:

(1) 设地下水环境负效应评价等级为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_p\}$, 评价指标集为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_q\}$, 其中各个评价指标 $t_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 关于地下水环境负效应等级 $s_j (j = 1, 2, \dots, p)$ 的等级划分标准值表示为 A_{ij} , 所有值用矩阵简记为 $F = (A_{ij})_{q \times p}$ 。

(2) 构建直觉模糊决策矩阵 F_a 。第 i 个评价指标的实测值 t_i 对等级标准区间 $[S_j, \bar{S}_j]$ 的隶属度和非隶属度模型为 $F_a = \langle \mu_{ij}, \nu_{ij} \rangle$, 其中:

$$\mu_{ij} = \exp \left[- \frac{(t_i - c_{\mu j})^2}{2\sigma_{\mu j}^2} \right] \quad (5)$$

$$\nu_{ij} = 1 - \exp \left[- \frac{(t_i - c_{\nu j})^2}{2\sigma_{\nu j}^2} \right] \quad (6)$$

$$c_{\mu j} = c_{\nu j} = \frac{S_j + \bar{S}_j}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\mu j}^2 = - \frac{(\bar{S}_j - c_{\mu j})^2}{2 \ln \left(\frac{1 - \alpha}{2} \right)} \quad (8)$$

$$\sigma_{\nu j}^2 = - \frac{(\bar{S}_j - c_{\nu j})^2}{2 \ln \left(1 - \frac{1 - \alpha}{2} \right)} \quad (9)$$

式中: $c_{\mu j}, c_{\nu j}, \sigma_{\mu j}, \sigma_{\nu j}$ 为计算过程中的参数; α 为最大模糊犹豫度值, 本文取 0.2。

为了消除极值 S_{\min} 和 S_{\max} 对评价结果的影响, 当 $S_j = S_{\min}$ 为边界值时, 则 $c_{\mu j} = c_{\nu j} = S_j, \sigma_{\mu j}^2 = - \frac{(\bar{S}_j - c_{\mu j})^2}{2 \ln \frac{1 - \alpha}{2}}, \sigma_{\nu j}^2 = - \frac{(\bar{S}_j - c_{\nu j})^2}{2 \ln \left(1 - \frac{1 - \alpha}{2} \right)}$; 当 $S_j = S_{\max}$ 为

边界值时,则 $c_{\mu_j} = c_{v_j} = \bar{S}_j, \sigma_{\mu_j}^2 = -\frac{(\underline{S}_j - c_{\mu_j})^2}{2\ln\frac{1-\alpha}{2}}$,

$$\sigma_{v_j}^2 = -\frac{(\underline{S}_j - c_{v_j})^2}{2\ln(1 - \frac{1-\alpha}{2})}$$

根据第 i 个评价指标实测值 t_i 在第 s_j 等级的直觉模糊数 A_{ij} ,可得 q 个评价指标的直觉模糊集决策矩阵 F_a 为:

$$F_a = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & \cdots & s_p \\ \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_q \end{matrix} & \begin{bmatrix} \langle \mu_{11}, v_{11} \rangle & \langle \mu_{12}, v_{12} \rangle & \cdots & \langle \mu_{1p}, v_{1p} \rangle \\ \langle \mu_{21}, v_{21} \rangle & \langle \mu_{22}, v_{22} \rangle & \cdots & \langle \mu_{2p}, v_{2p} \rangle \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \langle \mu_{q1}, v_{q1} \rangle & \langle \mu_{q2}, v_{q2} \rangle & \cdots & \langle \mu_{qp}, v_{qp} \rangle \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

(3) 结合公式(3)和公式(10)计算地下水环境负效应评价指标的加权直觉模糊集决策矩阵 F_b 。

$$F_b = \omega_q F_a = \omega_q (\langle \mu_{ij}, v_{ij} \rangle)_{q \times p} = (\langle \vartheta_{ij} \mu_{ij}, \zeta_i + v_{ij} - \zeta_i v_{ij} \rangle)_{q \times p} \quad (11)$$

(4) 确定地下水环境负效应评价的直觉模糊集正负理想解 M^+, M^- 。

$$\begin{cases} M^+ = [\langle \mu_1^+, v_1^+ \rangle \langle \mu_2^+, v_2^+ \rangle \cdots \\ \langle \mu_i^+, v_i^+ \rangle \cdots \langle \mu_q^+, v_q^+ \rangle]^T \\ M^- = [\langle \mu_1^-, v_1^- \rangle \langle \mu_2^-, v_2^- \rangle \cdots \\ \langle \mu_i^-, v_i^- \rangle \cdots \langle \mu_q^-, v_q^- \rangle]^T \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\mu_i^+ = \max_{1 \leq j \leq p} \{\bar{\mu}_{ij}\}$; $v_i^+ = \min_{1 \leq j \leq p} \{v_{ij}\}$; $\mu_i^- = \min_{1 \leq j \leq p} \{\bar{\mu}_{ij}\}$; $v_i^- = \max_{1 \leq j \leq p} \{v_{ij}\}$; 且 $i = 1, 2, \dots, q$ 。

(5) 地下水环境负效应评价。计算各个等级的优属度 η_j ,最大优属度值对应等级作为地下水环境负效应的评价等级。

$$D_j^+ = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^q [(\mu_{ij} - \mu_j^+)^2 + (v_{ij} - v_j^+)^2 + (\mu_j^+ + v_j^+ - \mu_{ij} - v_{ij})^2]} \quad (13)$$

$$D_j^- = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^q [(\mu_{ij} - \mu_j^-)^2 + (v_{ij} - v_j^-)^2 + (\mu_j^- + v_j^- - \mu_{ij} - v_{ij})^2]} \quad (14)$$

$$\eta_j = \frac{(D_j^-)^2}{(D_j^+)^2 + (D_j^-)^2} \quad (15)$$

4 实例验证

以重庆市渝怀铁路歌乐山隧道为例^[14],根据该隧道工程的相关数据,获得该工程各评价指标的实际测量值如表 1 所示。根据上述建立的地下水环境负效应评价体系、分级标准以及所得的各指标的实测值,由公式(5)~(10)计算得到各指标的直觉模糊集决策矩阵 F_a 。以定量指标 t_1 与定性指标 t_4 为例,绘制其在各个评价等级的隶属函数、非隶属函数以及犹豫度函数如图 3 所示。(各定性指标量化结果:等级 I 为[0~2],等级 II 为[2~4],等级 III 为[4~6],等级 IV 为[6~8],等级 V 为[8~10])。

结合 AHP 计算步骤及参考文献[14]得到各个评价指标的主观权重 α 。

$$\alpha = [0.0679, 0.0393, 0.0705, 0.0834, 0.0681, 0.0617, 0.0781, 0.0387, 0.0535, 0.0251, 0.0386, 0.0419, 0.0539, 0.0419, 0.0477, 0.0362, 0.0554, 0.0538, 0.0455]^T$$

根据直觉模糊集决策矩阵 F_a 和公式(1)、(2),得到各评价指标的客观权重 β 。

表 1 实例工程各项评价指标的实测值

评价指标	实测值
$t_1 / \%$	40
t_2 / MPa	0.7
$t_3 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$	18
t_4	较发育
t_5	强径流区
t_6	裂隙发育褶皱
t_7	火成岩
t_8 / km^2	40
t_9 / mm	1082
t_{10} / mm	766.2
t_{11}	0.18
t_{12} / m^3	160
t_{13}	河流型
$t_{14} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	小于 0.1
t_{15}	全断面法
t_{16} / m^2	45
t_{17} / km	0.405
t_{18} / km	1.02
t_{19} / m	230

$$\beta = [0.0527, 0.0524, 0.0528, 0.0529, 0.0529, 0.0529, 0.0524, 0.0525, 0.0525, 0.0527, 0.0525, 0.0528, 0.0529, 0.0521, 0.0529, 0.0525, 0.0526, 0.0525, 0.0527]^T$$

通过公式(3)得到的组合权重 ω_q 。

$$\omega_q = [\langle 0.0680, 0.0518 \rangle, \langle 0.0391, 0.0534 \rangle, \langle 0.0706, 0.0516 \rangle, \langle 0.0837, 0.0509 \rangle, \langle 0.0684, 0.0518 \rangle, \langle 0.0619, 0.0521 \rangle, \langle 0.0777, 0.0512 \rangle, \langle 0.0386, 0.0534 \rangle,$$

$$\langle 0.0534, 0.0526 \rangle, \langle 0.0251, 0.0542 \rangle, \langle 0.0385, 0.0534 \rangle, \langle 0.0420, 0.0532 \rangle, \langle 0.0541, 0.0525 \rangle, \langle 0.0414, 0.0533 \rangle, \langle 0.0479, 0.0529 \rangle, \langle 0.0361, 0.0536 \rangle, \langle 0.0553, 0.0525 \rangle, \langle 0.0536, 0.0526 \rangle, \langle 0.0445, 0.0531 \rangle]^T$$

由公式(10)得出直觉模糊集决策矩阵 F_a , 再根据所确定的组合权重 ω_q 结合公式(11)得到加权直觉模糊集决策矩阵 F_b 。

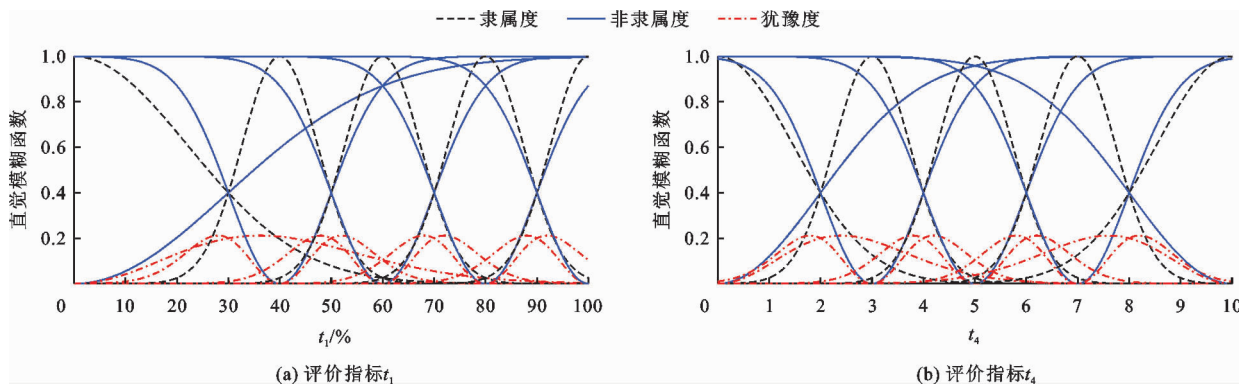


图3 指标 t_1 、 t_4 在各个评价等级的隶属函数、非隶属函数以及犹豫度函数

$$F_a = \begin{bmatrix} \langle 0.1961, 0.5967 \rangle \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0.1660, 0.6326 \rangle \langle 0.9640, 0.0202 \rangle & \langle 0.2126, 0.5782 \rangle \langle 0, 0.9962 \rangle & \langle 0.0420, 0.8292 \rangle \\ \langle 0, 0.9987 \rangle \langle 0, 0.9999 \rangle & \langle 0.0119, 0.9156 \rangle \langle 0.9640, 0.0202 \rangle & \langle 0.1660, 0.6326 \rangle \\ \langle 0.0033, 0.9589 \rangle \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.7953, 0.1199 \rangle \\ \langle 0.0033, 0.9589 \rangle \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.7953, 0.1199 \rangle \\ \langle 0.0033, 0.9589 \rangle \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.7953, 0.1199 \rangle \\ \langle 0.1272, 0.6832 \rangle \langle 0.0256, 0.8704 \rangle & \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 0.1272, 0.6832 \rangle \\ \langle 0, 0.9997 \rangle \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.4000, 0.4000 \rangle \langle 0.4000, 0.4000 \rangle & \langle 0, 0.9899 \rangle \\ \langle 0.0508, 0.8101 \rangle \langle 0, 0.9994 \rangle & \langle 0.0481, 0.8159 \rangle \langle 0.6164, 0.2364 \rangle & \langle 0.0080, 0.9322 \rangle \\ \langle 0.9742, 0.0145 \rangle \langle 0.6693, 0.2006 \rangle & \langle 0, 0.9999 \rangle \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.4639, 0.3483 \rangle \\ \langle 0, 0.9987 \rangle \langle 0.0958, 0.7296 \rangle & \langle 0.7190, 0.1680 \rangle \langle 0.0119, 0.9156 \rangle & \langle 0.0851, 0.7649 \rangle \\ \langle 0, 0.9947 \rangle \langle 0, 0.9973 \rangle & \langle 0.6383, 0.2214 \rangle \langle 0.0061, 0.9419 \rangle & \langle 0.0014, 0.9745 \rangle \\ \langle 0.0033, 0.9589 \rangle \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0256, 0.8704 \rangle \langle 1, 0 \rangle & \langle 0.7953, 0.1199 \rangle \\ \langle 0.4000, 0.4000 \rangle \langle 0.4000, 0.4000 \rangle & \langle 0.1160, 0.6991 \rangle \langle 0.1362, 0.6709 \rangle & \langle 0, 0.9893 \rangle \\ \langle 0, 0.9981 \rangle \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle \langle 0.0256, 0.8704 \rangle & \langle 0.7953, 0.1199 \rangle \\ \langle 0.4761, 0.3388 \rangle \langle 0.3022, 0.4869 \rangle & \langle 0.0143, 0.9065 \rangle \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.9998 \rangle \langle 0.0213, 0.8831 \rangle & \langle 0.6383, 0.2214 \rangle \langle 0.0972, 0.7273 \rangle & \langle 0, 0.9986 \rangle \\ \langle 0.0026, 0.9639 \rangle \langle 0.3526, 0.4408 \rangle & \langle 0.4298, 0.3755 \rangle \langle 0, 0.9886 \rangle & \langle 0, 0.9893 \rangle \\ \langle 0.0079, 0.9329 \rangle \langle 0.9208, 0.0449 \rangle & \langle 0.0708, 0.7715 \rangle \langle 0.0190, 0.8903 \rangle & \langle 0.0027, 0.9630 \rangle \end{bmatrix}$$

$$F_b = \begin{bmatrix} \langle 0.0133, 0.6176 \rangle & \langle 0.0680, 0.0518 \rangle & \langle 0.0017, 0.8771 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0.0065, 0.6522 \rangle & \langle 0.0377, 0.0725 \rangle & \langle 0.0083, 0.6007 \rangle & \langle 0, 0.9964 \rangle & \langle 0.0016, 0.8383 \rangle \\ \langle 0, 0.9987 \rangle & \langle 0, 0.9999 \rangle & \langle 0.0008, 0.9200 \rangle & \langle 0.0681, 0.0708 \rangle & \langle 0.0117, 0.6515 \rangle \\ \langle 0.0003, 0.9610 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0021, 0.8770 \rangle & \langle 0.0837, 0.0509 \rangle & \langle 0.0666, 0.1647 \rangle \\ \langle 0.0002, 0.9611 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0017, 0.8771 \rangle & \langle 0.0684, 0.0518 \rangle & \langle 0.0544, 0.1654 \rangle \\ \langle 0.0002, 0.9611 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0016, 0.8772 \rangle & \langle 0.0619, 0.0521 \rangle & \langle 0.0493, 0.1658 \rangle \\ \langle 0.0099, 0.6994 \rangle & \langle 0.0020, 0.8770 \rangle & \langle 0.0777, 0.0512 \rangle & \langle 0.0020, 0.8770 \rangle & \langle 0.0099, 0.6994 \rangle \\ \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.0154, 0.4320 \rangle & \langle 0.0154, 0.4320 \rangle & \langle 0, 0.9905 \rangle \\ \langle 0.0027, 0.8201 \rangle & \langle 0, 0.9995 \rangle & \langle 0.0026, 0.8255 \rangle & \langle 0.0329, 0.2766 \rangle & \langle 0.0004, 0.9357 \rangle \\ \langle 0.0244, 0.0679 \rangle & \langle 0.0168, 0.2439 \rangle & \langle 0, 0.9999 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.0116, 0.3836 \rangle \\ \langle 0, 0.9987 \rangle & \langle 0.0037, 0.7440 \rangle & \langle 0.0277, 0.2124 \rangle & \langle 0.0005, 0.9201 \rangle & \langle 0.0033, 0.7604 \rangle \\ \langle 0, 0.9949 \rangle & \langle 0, 0.9974 \rangle & \langle 0.0268, 0.2629 \rangle & \langle 0.0003, 0.9450 \rangle & \langle 0.0006, 0.9759 \rangle \\ \langle 0.0002, 0.9611 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0014, 0.8772 \rangle & \langle 0.0541, 0.0525 \rangle & \langle 0.0430, 0.1661 \rangle \\ \langle 0.0166, 0.4320 \rangle & \langle 0.0166, 0.4320 \rangle & \langle 0.0048, 0.7151 \rangle & \langle 0.0056, 0.6884 \rangle & \langle 0, 0.9899 \rangle \\ \langle 0, 0.9982 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 0.9997 \rangle & \langle 0.0012, 0.8773 \rangle & \langle 0.0381, 0.1664 \rangle \\ \langle 0.0172, 0.3743 \rangle & \langle 0.0109, 0.5143 \rangle & \langle 0.0005, 0.9115 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.9998 \rangle & \langle 0.0012, 0.8893 \rangle & \langle 0.0353, 0.2623 \rangle & \langle 0.0054, 0.7417 \rangle & \langle 0, 0.9987 \rangle \\ \langle 0.0001, 0.9658 \rangle & \langle 0.0189, 0.4702 \rangle & \langle 0.0230, 0.4083 \rangle & \langle 0, 0.9892 \rangle & \langle 0, 0.9899 \rangle \\ \langle 0.0003, 0.9365 \rangle & \langle 0.0410, 0.0956 \rangle & \langle 0.0032, 0.7836 \rangle & \langle 0.0008, 0.8961 \rangle & \langle 0.0001, 0.9649 \rangle \end{bmatrix}$$

根据加权直觉模糊集决策矩阵 F_b 和公式(12) 计算直觉模糊集的正负理想解。由直觉模糊集的正负理想解和公式(13) ~ (15) 计算各个等级对应的直觉模糊集正、负理想解的欧几里得距离及优属度,计算结果见表 2。

$$M^+ = [\langle 0.0680, 0.0518 \rangle \quad \langle 0.0377, 0.0725 \rangle \quad \langle 0.0681, 0.0708 \rangle \quad \langle 0.0837, 0.0509 \rangle \\ \langle 0.0684, 0.0518 \rangle \quad \langle 0.0619, 0.0521 \rangle \quad \langle 0.0777, 0.0512 \rangle \quad \langle 0.0154, 0.4320 \rangle \\ \langle 0.0329, 0.2766 \rangle \quad \langle 0.0244, 0.0679 \rangle \quad \langle 0.0277, 0.2124 \rangle \quad \langle 0.0268, 0.2629 \rangle \\ \langle 0.0541, 0.0525 \rangle \quad \langle 0.0166, 0.4320 \rangle \quad \langle 0.0381, 0.1664 \rangle \quad \langle 0.0172, 0.3743 \rangle \\ \langle 0.0353, 0.2623 \rangle \quad \langle 0.0230, 0.4083 \rangle \quad \langle 0.0410, 0.0956 \rangle]^T$$

$$M^- = [\langle 0, 1 \rangle \quad \langle 0, 0.9964 \rangle \quad \langle 0, 0.9999 \rangle \quad \langle 0, 0.9997 \rangle \quad \langle 0, 0.9997 \rangle \quad \langle 0, 0.9997 \rangle \\ \langle 0.0020, 0.8770 \rangle \quad \langle 0, 1 \rangle \quad \langle 0, 0.9995 \rangle \quad \langle 0, 1 \rangle \quad \langle 0, 0.9987 \rangle \quad \langle 0, 0.9974 \rangle \\ \langle 0, 0.9997 \rangle \quad \langle 0, 0.9899 \rangle \quad \langle 0, 1 \rangle \quad \langle 0, 1 \rangle \quad \langle 0, 0.9998 \rangle \quad \langle 0, 0.9899 \rangle \quad \langle 0.0001, 0.9649 \rangle]^T$$

表 2 正、负理想解的欧几里得距离及优属度

计算参数	地下水负效应等级				
	I	II	III	IV	V
D_j^+	3.3721	3.0991	2.8022	2.8967	3.0284
D_j^-	1.3900	1.9685	1.8777	2.2774	1.9868
η_j	0.1452	0.2875	0.3099	0.3820	0.3009

将本文的评价结果与其他文献中不同评价模型的评价结果进行比较,如表 3 所示。由表 3 可以看出,本文与相关文献的评价结果相同。而且通过现

场调查,此评价结果与实际情况相符合,证明了本文所构建的直觉模糊 TOPSIS 耦合综合评价模型的合理性和可靠性,该模型能够为类似隧道工程的模拟计算提供相应的参考。

此外,在文献[14]中取置信度 $\lambda = 0.6$ 作为评价准则,由表 3 可得 $0.103 + 0.258 + 0.224 = 0.585$,如果考虑小数位数保留 1 位数,则最后的评价结果会变成 III 级,与实际情况有差异。而本文提出的评价方法及模型很好地克服了这个缺陷,与文献[14]相比具有一定的优越性。

表3 隧道地下水环境负效应不同评价模型的评价结果比较

评价方法	地下水负效应等级					所属等级
	I	II	III	IV	V	
模糊综合评价法(文献[13])	0.189	0.215	0.192	0.301	0.103	IV(较强)
未知测度模型(文献[14])	0.103	0.258	0.224	0.361	0.062	IV(较强)
直觉模糊 TOPSIS 耦合模型(本文)	0.1452	0.2875	0.3099	0.3820	0.3009	IV(较强)

5 结论

(1) 本文根据相关标准(TB 10049-2014)8.24节以及参考文献[14],遵循“压力-状态-响应”(PSR)模式和全过程管理的思想,从自然地理、隧道工程以及地质-水文地质3个方面考虑,提出了隧道施工引起的地下水环境负效应评价体系。

(2) 结合地下水环境的复杂性和不确定性,本文提出了由AHP和直觉模糊熵确定的组合权重的直觉模糊集和TOPSIS耦合模型,充分考虑了主观赋权法中专家对实际工程的经验和客观赋权法中遵从客观事实的优点,合理利用了直觉模糊集的非隶属度与犹豫度,为隧道施工引起的地下水环境负效应评价提供了更加详细可靠的评价模型。

(3) 将本文评价模型得到的评价结果与文献[13]、[14]中不同评价模型的评价结果进行对比,得到的评价等级均为IV级,验证了本文提出的评价模型的可靠性。同时与文献[14]相比,排除了由于小数位数保留不同而引起的误差使评价结果发生改变的影响,展示了本文提出的耦合模型的优越性。为今后对于隧道施工引起的地下水环境负效应研究提供了理论参考和依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李苍松,李强,史永跃,等. 关于川藏铁路隧道施工地下水环境保护的认识和建议[J]. 现代隧道技术,2019,56(S1):24-33.
- [3] 赵瑜,胡波,陈海林,等. 岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(5):1-8.
- [4] 李中原,王国重,张继宇,等. 彰武水库水环境安全评估[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):89-94.
- [5] 党晋华,赵颖,马晓勇,等. 汾河水库上游流域土地利用类型变化特征及其水环境效应研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):62-68.
- [6] 彭欣雨,唐德善. 基于组合权重-理想区间法的河长制实施效果评价模型及应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):50-56.
- [7] 田皓予,佟玲,余国安,等. 1997-2017年泰国蒙河流域水环境时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):30-38.
- [8] 郭成刚,郭永发,朱孟龙,等. 红层环境下的碳酸盐岩岩溶隧道暗河水文地质调查研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(1):58-64.
- [9] 郑波,王建宇,吴剑. 高水压富水隧道地下水处治理念与对策[J]. 现代隧道技术,2019,56(S1):51-57.
- [10] 谢全敏,但山林,杨文东. 山区公路隧道建设对地下水环境扰动评价研究[J]. 高校地质学报,2019,25(3):437-443.
- [11] 陈旭,王光能,王科. 云桂线新莲隧道涌突水成因分析[J]. 铁道工程学报,2018,35(8):67-71.
- [12] 刘月,于翠松,曹升乐,等. 东阿地下水源地水质综合评价方法研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):99-103.
- [13] 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):178-183.
- [14] 万炳彤,鲍学英,李爱春. 隧道施工引起的地下水环境负效应评价体系研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):58-63+71.
- [15] 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.
- [16] 刘满凤,任海平. 基于一类新的直觉模糊熵的多属性决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(11):2909-2916.
- [17] 张立彪,汪明武,李彪,等. 基于直觉-TOPSIS理论的路面性能评价模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(7):934-938.
- [18] 张浩为,谢军伟,葛佳昂,等. 改进TOPSIS的多态融合直觉模糊威胁评估[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(10):2263-2269.
- [19] 王亚男,雷英杰,王毅,等. 基于直觉模糊推理的直觉模糊时间序列模型[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(6):1332-1338.
- [20] 许杨,陈菁,夏欢,等. 基于DPSR-改进TOPSIS模型的淮安市水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):47-52+62.