

# 基于 ANP - 灰色关联 TOPSIS 法的引水隧洞 病害安全性评价

祁英弟, 靳春玲, 贡力

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为客观评价西北地区引水隧洞病害安全状态, 结合西北地区引水隧洞在运营期存在的病害问题, 建立引水隧洞病害安全评价指标体系。应用 Super Decision 软件用 ANP 法确定各指标权重, 在传统 TOPSIS 法的基础上加入灰色关联理论, 构建西北地区引水隧洞病害安全评价模型。运用该模型以引大入秦工程盘道岭隧洞 6 个典型隧洞段为研究对象进行病害安全性评价, 得出各隧洞段病害安全等级。评价结果客观准确, 验证了所建指标体系及模型的科学合理性, 可运用于长距离引水工程安全研究方面。

**关键词:** 引水隧洞; 病害; 安全性评价; 网络层次分析法; 灰色关联 TOPSIS 法

**中图分类号:** TV698.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2019)01-0143-07

## Safety evaluation of diversion tunnel disease based on ANP - Grey correlation TOPSIS Method

QI Yingdi, JIN Chunling, GONG Li

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

**Abstract:** In order to objectively evaluate the safety state of diversion tunnel disease in Northwest China, the safety evaluation index system of diversion tunnel disease is established in view of the disease problems existing in the operation period of diversion tunnel in Northwest China. The weight of each index is determined by using Super Decision software and ANP method. Based on the traditional TOPSIS method, the grey relational theory is added to construct the safety evaluation model of diversion tunnel in Northwest China. The model is used to evaluate the safety of six typical tunnel sections in Pandaoling tunnel in Introducing Datonghe into Qinwangchuan Project, and the safety grade of each tunnel segment is obtained. The evaluation results are objective and accurate, which verify the scientific rationality of the established index system and model, and can be applied to the safety research of long distance water diversion projects.

**Key words:** diversion tunnel; disease; safety evaluation; ANP(analytic network process); grey correlation TOPSIS method

## 1 研究背景

随着我国国民经济的发展及用水需求的增加, 为解决水资源时空分布不均及满足生产、生活及生态等方面的要求, 跨流域调水引水工程发挥着不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。为实现长期安全供水, 确保引水工程中所有建筑物的安全性是长效发挥引水工程效益的重要工作, 而引水隧洞是引水工程的咽喉, 也是

引水线的重要组成部分。我国建于西北寒旱地区的引水隧洞由于地处西北其地质及自然条件恶劣, 随着工程的投入使用及各种不良因素的影响, 引水隧洞的多种病害问题也随之暴露<sup>[3]</sup>。为此, 进行隧洞病害安全性评价研究, 诊断出引水隧洞存在的病害问题及所处的安全等级, 使隧洞能够长久安全运行, 具有很重要的意义。

在长距离引水工程安全研究方面, 司春棣<sup>[4]</sup>提

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669010); 甘肃省自然科学基金项目(17JR5RA105, 1506RJZA082)

作者简介: 祁英弟(1993-), 女, 甘肃临夏人, 在读硕士研究生, 主要从事土木工程建设与管理研究工作。

通讯作者: 靳春玲(1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 教授, 主要从事水安全及水利工程项目管理研究工作。

出了引水工程安全保障体系的概念,并对引水建筑物安全性态从安全评价系统和应急系统两个层次进行综合评价研究。Dong Longjun 等<sup>[5]</sup>用 I JAG 法建立了隧道围岩分类 UAG 模型,对引水隧洞围岩安全性进行了评价研究。王桂平等<sup>[6]</sup>引入了基于模糊神经网络的综合评判方法,对水工隧洞的病害问题进行了诊断研究。Jia Xiaoyun 等<sup>[7]</sup>采用有限元软件 ANSYS 对引水隧洞衬砌温度场进行了数值模拟,解决了温度变化引起的混凝土裂缝问题。王梦雅等<sup>[8]</sup>提出了基于物元模型和关联函数的可拓理论,对渡槽结构的安全运行方面进行了研究。潘洪科等<sup>[9]</sup>结合检测信息进行三维数值模拟,对输水工程中渡槽的病害问题进行了分析与防治研究。Swanell 等<sup>[10]</sup>用 Shelvip 模型制定了施工风险管理办法,以便有效控制引水隧洞施工安全风险。我国对引水隧洞病害安全方面的研究较少,其病害评价指标体系及现有评价模型很不完善,有待进一步研究。

本文在既有研究的基础上提出针对西北地区引水隧洞的病害评价指标体系,应用 ANP 求解出引水隧洞病害各指标权重,解决了在各指标赋权时同一层次中不同影响因素之间存在的相互影响、相互依

存关系。并将灰色关联理论与 TOPSIS 法相结合,首先对盘道岭隧洞各典型段病害问题样本数据进行灰色关联分析,挖掘出其数据分布的内在规律,再用 TOPSIS 法贴适度排序思想对各评价对象进行优劣排序,得出各隧洞段病害安全等级。

## 2 隧洞病害评价指标体系的建立

西北地区有着复杂的工程地质及水文地质环境,如引水隧洞围岩岩体的塑性流变特征易造成隧洞洞身产生裂缝病害,地下水中所含  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等对引水隧洞衬砌有严重腐蚀危害等等。根据《公路隧道养护规范》《铁路桥隧建筑物劣化评定标准》《水利水电工程施工质量检验与评定规程》,识别出西北地区引水隧洞运营期出现的衬砌变形及剥落、渗漏水、衬砌裂缝、材质劣化、衬砌腐蚀 5 类病害问题,建立如表 1 所示的引水隧洞病害评价指标体系及判定标准。

参照国内外隧洞病害等级划分标准及《公路隧道养护技术规范》中的等级划分标准,本文将隧洞病害安全评价等级划分为严重、较严重、一般和轻微 4 级,如表 2 所示。

表 1 引水隧洞病害评价指标体系及判定标准

一级指标	二级指标		安全性等级			
			安全	预警	报警	危险
衬砌裂缝 (L)	长度 $l/\text{m}$ , 宽度 $b/\text{m}$	$L_1$	$l \leq 2, b < 0.2$	$0.2 \leq b < 0.3$	$0.3 \leq b < 0.5$	$l > 2, b \geq 0.5$
	裂缝深度 / 衬砌厚度	$L_2$	$< 0.3$	$0.3 \sim 0.5$	$0.5 \sim 0.7$	$> 0.7$
渗漏水 (S)	拱部滴水	$S_1$	浸渗	滴漏	涌流	喷射
	侧墙漏水	$S_2$	浸渗	滴漏、涌流	喷射	
	冻害	$S_3$	挂冰不影响过流	挂冰影响过流		
材质劣化 (C)	衬砌强度(实际强度 / 设计强度)	$C_1$	$> 0.8$	$0.5 \sim 0.8$	$< 0.5$	
	衬砌厚度(不足的厚度 / 设计厚度)	$C_2$	0	$0.01 \sim 0.1$	$0.1 \sim 0.5$	$> 0.5$
	钢筋腐蚀截面损失率 / %	$C_3$	$< 3$	$3 \sim 10$	$10 \sim 25$	$> 25$
衬砌变形、 剥落(B)	变形速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	$B_1$	$< 1$	$1 \sim 3$	$3 \sim 10$	$> 10$
	剥落深度 / mm	$B_2$	$< 6$	$6 \sim 12$	$12 \sim 25$	$> 25$
	剥落直径 / mm	$B_3$	$< 50$	$50 \sim 75$	$75 \sim 150$	$> 150$
衬砌腐蚀 (F)	腐蚀性离子含量	$F_1$	低	较低	高	较高
	衬砌碳化深度 / cm	$F_2$	$< 0.6c$	$0.6c \sim 0.8c$	$0.8c \sim c$	$> c$

注:  $c$  为衬砌结构保护层厚度。

## 3 安全评价模型

### 3.1 ANP 法确定指标权重

ANP (Analytic Network Process) 全称网络层次

分析法,是美国匹兹堡大学 Saaty 教授在层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 的基础上于 1996 年提出。

由于引水隧洞各病害因素相互影响,ANP 更加

全面地考虑了元素间可能存在的关联和反馈关系,在确定指标权重时更加可靠<sup>[11-12]</sup>。ANP 法求指标权重的基本步骤如下:

(1)根据上述建立的引水隧洞病害评价指标确定其间存在的相互影响关系,进而构建出引水隧洞病害安全评价的 ANP 网络结构模型。

表 2 引水隧洞病害评价等级

病害等级	表现状态	判定结论
A	严重	结构存在严重破坏,已危及输水运营安全,必须立即采取紧急应对措施
B	较严重	结构存在较严重破坏,将会危及输水运营安全,应尽早采取应对措施
C	一般	结构存在破坏,可能会危及输水运营安全,应准备采取应对措施
D	轻微	结构无破损或存在轻微破损,对输水运营不会有影响

(2)假设  $X_1, X_2, \dots, X_M$  为 ANP 结构中的控制层元素,  $x_1, x_2, \dots, x_N$  为网络层元素组,  $e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, \dots, e_{in} (i = 1, 2, \dots, N)$  为  $x_i$  中的元素。以  $X_s (s = 1, 2, \dots, M)$  为准则,  $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$  中的元素  $e_{jl} (l = 1, 2, \dots, n)$  为次准则,比较  $x_i$  中的元素对  $e_{jl}$  的重要度大小,构造出判断矩阵。

(3)由构造出的判断矩阵得出网络元素排序向量,继而形成超矩阵子块  $W_{ij}$ :

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \dots & w_{i2}^{(jn)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in}^{(j1)} & w_{in}^{(j2)} & \dots & w_{in}^{(jn)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

进而得到在以  $X_s$  为准则下的超矩阵  $W$ :

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{M1} & W_{M2} & \dots & W_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(4)在  $X_s$  为准则下,以  $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$  为次准则,比较其他元素组对  $x_i$  的优势度大小,得到归一化特征向量  $(p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{Nj})^T$ ,将各个元素组特征向量组合得到元素组权重矩阵  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \dots & p_{MN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则可求得加权超矩阵:

$$\bar{W} = PW = (p_{ij} \times W_{ij}) \quad (4)$$

(5)对求出的加权超矩阵  $\bar{W}$  利用 Super Decision 软件进行自相乘  $\beta$  次,使得超矩阵趋于稳定。最后使得乘积收敛,则第  $j$  列就是  $X_s$  网络层各元素的全局权重向量。

### 3.2 灰色关联 TOPSIS 模型

考虑到现阶段对西北地区引水隧洞病害数据统计有局限,且现有数据灰度较大,本文采用灰色关联理论与 TOPSIS 相结合的方法。在保证 TOPSIS 方法计算简便且有较好客观性的前提下<sup>[13-15]</sup>,充分利用灰色关联理论不需要太多数据就能挖掘其分布规律的特点<sup>[16-18]</sup>,运用灰色关联 TOPSIS 模型对西北地区既有引水隧洞病害问题进行安全性评价。灰色关联 TOPSIS 模型算法如下:

(1)假设有  $m$  个评价对象  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  每个方案有  $n$  个评价指标  $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ,在此基础上建立初始评价矩阵  $R$ :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $r_{ij}$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  项评价指标,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

对建立的初始评判矩阵做标准化处理,进而得到标准化矩阵  $S$ :

$$S = (s_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$s_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (7)$$

( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ )

(2)将得到的标准化矩阵  $S$  与求得各指标综合权重相乘即得到加权标准化矩阵  $T$ :

$$T = (t_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & \cdots & t_{m1} \\ t_{12} & t_{22} & \cdots & t_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{1n} & t_{2n} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$t_{ij} = s_{ij} \cdot W_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中:  $W_j$  为第  $j$  项指标的综合权重。

(3) 计算出加权标准化矩阵  $T$  的理想解和负理想解:

$$t_j^+ = (t_{1j}^+, t_{2j}^+, \dots, t_{mj}^+), t_j^- = (t_{1j}^-, t_{2j}^-, \dots, t_{mj}^-) \quad (10)$$

对于越大越优型指标,其理想解  $t_j^+$  和负理想解  $t_j^-$  分别为:

$$t_j^+ = \max\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\} \quad (11)$$

$$t_j^- = \min\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\}$$

对于越小越优型指标,其理想解  $t_j^+$  和负理想解  $t_j^-$  分别为:

$$t_j^+ = \min\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\} \quad (12)$$

$$t_j^- = \max\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\}$$

(4) 计算各评价对象与理想解的灰色关联系数:

$$c_i = \frac{\min_i |t(j) - t_{ij}| + \rho \max_i |t(j) - t_{ij}|}{|t(j) - t_{ij}| + \rho \max_i |t(j) - t_{ij}|} \quad (13)$$

其中  $\rho$  为分辨系数且  $0 < \rho < 1$ , 本文取值为  $\rho = 0.5$ 。

通过上式计算出各评估对象与理想解之间的灰色关联系数矩阵  $C$ :

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & \cdots & c_{m1} \\ c_{12} & c_{22} & \cdots & c_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{1n} & c_{2n} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

(5) 计算灰色关联系数矩阵  $C$  的理想解和负理想解:

$$c^+ = (c_1^+, c_2^+, \dots, c_n^+), c^- = (c_1^-, c_2^-, \dots, c_n^-) \quad (15)$$

$$c_j^+ = \max\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}\} \quad (16)$$

$$c_j^- = \min\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}\} \quad (17)$$

(6) 计算各评价对象与理想解和负理想解的欧式距离:

$$d_i^+ = \|c^+ - c_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c^+ - c_{ij})^2} \quad (17)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

$$d_i^- = \|c^- - c_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c^- - c_{ij})^2} \quad (18)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

(7) 计算各评价对象的相对贴近度:

$$N_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (19)$$

根据最终求得的各评价对象的相对贴近度  $N_i$  判定所评价对象的病害安全等级,  $N_i$  越大, 表明所评价对象离理想值越近, 则病害等级越低, 反亦之。其中相对贴近度  $N_i$  大于 0.8 为 D 级, (0.6, 0.8] 为 C 级, (0.4, 0.6] 为 B 级, 小于等于 0.4 为 A 级。

## 4 西北地区隧洞病害安全性评价

盘道岭隧洞位于西部干寒地区, 是“引大入秦”灌溉工程总干渠的控制性工程且为最长的无压引水隧洞。由于其穿过的地段地质条件复杂多变, 再加上地下水的侵蚀、冲刷等原因, 隧洞在运营后出现了衬砌裂缝、渗漏水、材质劣化、衬砌变形、剥落等病害问题<sup>[19]</sup>, 经历了多次维修加固目前仍存在很多问题。本文通过对盘道岭隧洞现阶段的病害问题进行调查分析, 将盘道岭隧洞划分为 6 个典型洞段并对各洞段病害问题进行安全性评价, 得出盘道岭隧洞既有安全状态。盘道岭隧洞各段划分及显著特点见表 3。

表 3 盘道岭隧洞各段划分及显著特点

洞段	各隧洞段特点
K76 + 235 ~ K77 + 633	第三系地层为单斜缓倾层状岩体, 断层有 28 条, 断层破碎带宽 0.02 ~ 0.1m
K77 + 633 ~ K77 + 757	埋深 60 ~ 77m, 有地下水; 岩性为第三系粉(细)砂岩夹泥质砂岩, 属 V 类围岩
K77 + 757 ~ K80 + 230	氯盐和硫酸盐对钢筋的侵蚀严重, 硫酸根离子含量最高值达 6878 mg/L, 对混凝土有硫酸盐侵蚀危害
K80 + 230 ~ K86 + 402	第三系地层为连续平缓、背向斜褶皱曲地段, 围岩断层中以压扭性断层为主, 氯离子的含量高
K86 + 402 ~ K86 + 507	埋深 265 ~ 335m, 无地下水, 有两条压扭性断层, 属第三系疏松褐色泥质砂岩及红黄色砂岩, 属 V 类围岩
K86 + 507 ~ K91 + 958	白垩系地层在地表为褶皱陡层状岩体, 在洞身部位为褶皱缓倾层状岩体, 围岩中有断层 29 条, 以压扭性断层为主



表6 盘道岭隧洞病害评价指标标准化矩阵及权重

类别层	指标层	K76 + 235 ~ K77 + 633	K77 + 633 ~ K77 + 757	K77 + 757 ~ K80 + 230	K80 + 230 ~ K86 + 402	K86 + 402 ~ K86 + 507	K86 + 507 ~ K91 + 958	权重
衬砌裂缝 (L)	$L_1$	0.0862	0.1684	0.2602	0.2010	0.1352	0.1489	0.1678
	$L_2$	0.0587	0.2500	0.2875	0.2271	0.0210	0.1557	0.1429
渗漏水 (S)	$S_1$	0.0954	0.1413	0.3192	0.2261	0.0836	0.1343	0.0500
	$S_2$	0.0819	0.1065	0.2347	0.2940	0.0758	0.2071	0.0370
	$S_3$	0.1493	0.2307	0.1754	0.1766	0.1317	0.1363	0.0690
材质劣化 (C)	$C_1$	0.1802	0.1740	0.1644	0.1128	0.2360	0.1325	0.0614
	$C_2$	0.0927	0.1596	0.2458	0.2997	0.1055	0.0967	0.0537
	$C_3$	0.0379	0.0923	0.0296	0.5731	0.1272	0.1399	0.0790
衬砌变形、 剥落(B)	$B_1$	0.1836	0.1408	0.2473	0.1447	0.1266	0.1570	0.1039
	$B_2$	0.1288	0.1940	0.1760	0.2693	0.0076	0.2243	0.1138
	$B_3$	0.1209	0.2184	0.2062	0.1694	0.1559	0.1292	0.1013
衬砌腐蚀 (F)	$F_1$	0.1495	0.2469	0.2145	0.1586	0.1081	0.1225	0.0095
	$F_2$	0.1836	0.1408	0.2473	0.1447	0.1266	0.1570	0.0108

表7 盘道岭隧洞各隧洞段的欧式距离与相对贴适度

隧洞段	$d_i^+$	$d_i^-$	$N_i$	病害等级
K76 + 235 ~ K77 + 633	0.0726	0.3201	0.8151	D
K77 + 633 ~ K77 + 757	0.1027	0.2136	0.6753	C
K77 + 757 ~ K80 + 230	0.1808	0.1752	0.4921	B
K80 + 230 ~ K86 + 402	0.1376	0.2043	0.5976	B
K86 + 402 ~ K86 + 507	0.0684	0.2804	0.8039	D
K86 + 507 ~ K91 + 958	0.1064	0.2623	0.7114	C

由表7可知, K76 + 235 ~ K77 + 633段和 K86 + 402 ~ K86 + 507两隧洞段病害等级为D级, 结构存在轻微破损, 对输水运营基本不会有影响; K77 + 633 ~ K77 + 757及 K86 + 507 ~ K91 + 958隧洞段结构存在破坏, 其病害等级为C级, 其中 K77 + 633 ~ K77 + 757洞段受地下水的侵扰及恶劣地质条件的影响, 经施工时大塌方和暴雨径流冲刷两次大扰动, 其裂缝开度大, 发展速度快, 在经过维修加固处理后, 现阶段该隧洞段病害问题基本得到控制, 但仍有裂缝发育情况, 并伴随着轻度的渗漏水现象; K77 + 757 ~ K80 + 230和 K80 + 230 ~ K86 + 402隧洞段病害情况较严重, 病害等级达到B级, 其中 K77 + 757 ~ K80 + 230隧洞段处的地下水因为氯盐和硫酸盐含量较高, 其渗漏水随着衬砌裂缝和排水孔对钢筋有严重的侵蚀, 使混凝土保护层发生裂纹和剥离等破坏现象, 大大降低了钢筋的支撑能力, 应引起高度重视。

## 5 结论

(1) 本文在既有研究的基础上, 针对西北地区地形特点及气候状态建立引水隧洞病害安全评价指标体系及引水隧洞病害安全评价等级。考虑到各指标因素间的关联影响性, 运用 ANP 方法用 Super Decision 软件求出影响隧洞安全运行的各病害因素指标权重。

(2) 以西北地区引大入秦工程中的盘道岭隧洞为评价研究对象, 分析其各典型隧洞段在运营过程中存在的病害问题, 将灰色关联理论与 TOPSIS 方法相结合最终求出各隧洞段的相对贴适度, 得出各段所处的病害安全等级。

(3) 评价结果与实际情况相符合, 表明 ANP - 灰色关联 TOPSIS 模型能够克服各指标因素间的影响及数据资料的不足, 从而挖掘出所研究对象的典型分布规律, 得出可靠评价结果。该评价模型操作简单, 可运用于长距离引水工程安全研究方面。

### 参考文献:

- [1] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水利发电学报, 2015, 34(6): 49 - 56 + 212.
- [2] ABED - ELMDOUST A, KERACHIAN R. Evaluating the relative power of water users in inter - basin water transfer systems[J]. Water Resources Management, 2014, 28(2): 495 - 509.
- [3] 靳春玲, 贡力. 引洮工程中隧洞常见病害分析[J]. 人民

- 黄河,2012,34(10):108 - 109 + 113.
- [4] 司春棣. 引水工程安全保障体系研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [5] DONG Longjun, HU Datao, BAI Yunfei, et al. Unascertained average grade model for surrounding rock classification on hydraulic tunnels[C] // The 2008 International Symposium on Safety Science and Technology, China Occupational Safety and Health Association, Beijing:2008.
- [6] 王桂平,朱苦竹. 基于模糊神经网络的水工隧洞病害诊断研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(1):201 - 206.
- [7] JIA Xiaoyun, LIN Baolong. Numerical analysis of lining temperature field of hydraulic tunnel under the highway[J]. Advanced Materials Research,2011,163 - 167:1505 - 1515.
- [8] 王梦雅,夏富洲. 基于可拓理论的渡槽结构老化评价[J]. 武汉大学学报,2014,47(2):211 - 216 + 254.
- [9] 潘洪科,李业学,王爱勤. 渡槽工程的病害分析与防治研究[J]. 河南大学学报,2015,45(4):493 - 498.
- [10] SWANNELL N, PALMER M, BARLA G, et al. Geotechnical risk management approach for TBM tunnelling in squeezing ground conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,57(3):201 - 210.
- [11] 王莲芬. 网络分析法 (ANP) 的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践,2001(3):44 - 50.
- [12] VINODH S, GAUTHAM S G, ANESH RAMIYA R, et al. Application of fuzzy analytic network process for agile concept selection in a manufacturing organisation[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(24): 7243 - 7264.
- [13] 陈宇寒,张宏. 基于 PSO 和扩展 TOPSIS 方法的 COA 优选方法[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(8):2144 - 2151.
- [14] 柴乃杰,鲍学英,张天奇,等. TOPSIS - 熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):156 - 161.
- [15] DENG Hepu, YEH C H, WILLIS R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights [J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(10): 963 - 973.
- [16] 王锦辉,费良军,谢芳,等. 灰色关联理论 - TOPSIS 法的大型灌区运行状况综合评价[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(11):985 - 990.
- [17] LIU P, WANG T. Research on risk evaluation in supply chain based on grey relational method[J]. Journal of computers, 2008, 3(10): 28 - 35.
- [18] 田民,刘思峰,卜志坤. 灰色关联度算法模型的研究综述[J]. 理论新探,2008(1):24 - 27.
- [19] 尹庭杰,梁庆国,赵佃锦. 引大入秦工程盘道岭隧洞病害原因浅析[J]. 兰州交通大学学报,2014,33(4):82 - 88.

(上接第 142 页)

- [18] 王廷益. 厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站首部枢纽工程[J]. 云南水力发电,2014,30(5):3 - 7.
- [19] 杨继华,杨风威,姚阳,等. CCS 水电站引水隧洞 TBM 断层带卡机脱困技术[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):89 - 94.
- [20] 张国. 厄瓜多尔 CCS 项目双护盾 TBM 通过断层破碎带施工技术研究与实施[J]. 水利建设与管理,2018,38(6):1 - 6.
- [21] 王美斋,肖豫,陈晓年,等. 厄瓜多尔 CCS 水电站 TBM 引水隧洞左右通用型管片的设计与实践[J]. 资源环境与工程,2017,31(5):606 - 609.
- [22] 刘大贵,杨春雷. 厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站引水发电系统工程[J]. 云南水力发电,2014,30(5): 11 - 13 + 22.
- [23] 谢遵党. 厄瓜多尔辛克雷水电站压力管道充水试验[J]. 云南水力发电,2018,34(2):31 - 36.
- [24] 陈丽晔,王春,姚宏超. CCS 水电站隧洞钢衬美国标准与中国标准对比[J]. 人民黄河,2014,36(12):94 - 96.
- [25] 娄国川,齐三红,杨风威,等. 厄瓜多尔 CCS 水电站地下厂房稳定分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2014, 26(1):1 - 4.