

基于模糊灰色聚类-组合赋权的病险水库 康复度综合评价方法

刘冲¹, 沈振中¹, 甘磊¹, 熊素繁², 鲁剑²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 江西省宜春市水利局, 江西 宜春 336000)

摘要:针对目前除险加固后病险水库康复度难以准确评价的问题,构建了两层评价指标体系,结合模糊灰色聚类和组合赋权法对病险水库康复度进行量化评价。基于熵权法和层次分析法分别计算各康复类型评价指标的主、客观权重,采用组合赋权法将主、客观权重进行组合,得到能反映主客观影响的组合权重;采用灰色聚类法评价水库各康复类型的康复度,依据病险水库各康复类型聚类系数及组合权重创建综合评价的模糊判断矩阵,依据模糊判断矩阵由熵权法和层次分析法求出各康复类型的权重后采用组合赋权法进行组合,最终采用模糊综合评价法评估病险水库除险加固后的康复度。将该方法用于3座病险水库康复度评价,评价结果与水库除险加固实际情况及验收结论吻合,表明该方法具有一定的工程应用价值。

关键词:病险水库;康复度;模糊综合评价;熵权法;组合赋权;灰色聚类

中图分类号:TV697.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2018)03-0036-06

Comprehensive evaluation of rehabilitation degree of dangerous reservoirs based on fuzzy gray clustering and combination weighting method//LIU Chong¹, SHEN Zhenzhong¹, GAN Lei¹, XIONG Sufan², LU Jian²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yichun Water Conservancy Bureau, Yichun 336000, China)

Abstract: For the problem that the rehabilitation degree of dangerous reservoirs is difficult to be accurately evaluated, a two-layer index system was established. The fuzzy gray clustering and combination weighting method are combined to quantitatively evaluate the rehabilitation degree of reservoirs. Firstly, the subjective and objective weights of each evaluation index are calculated by entropy method and analytic hierarchy process, and a combination weight containing subjective and objective implications is obtained using the combination weighting method. Secondly, the gray clustering method is used to evaluate the rehabilitation degree of each rehabilitation type. The clustering coefficient of each rehabilitation type is adopted to create the fuzzy evaluation matrix, and then the weight of each rehabilitation type is calculated. Finally, the comprehensive evaluation method is utilized to accurately assess the rehabilitation degree of dangerous reservoirs after reinforcing. The method is applied to the reinforcement assessment of three reservoirs in Henan and Jiangxi Province and the results agree well with the practical situation of the reinforcement assessment and the acceptance conclusions, indicating a great value in engineering applications.

Key words: dangerous reservoir; rehabilitation degree; fuzzy comprehensive evaluation; entropy method; combination weighting; gray clustering

我国有各类水库约9.8万座,根据2010年全国大坝安全普查报告,已加固的病险水库占水库总数的40%。病险水库大量存在,不仅直接影响水库的经济效益,也严重威胁下游城乡居民的生命与财产安全。近年来,国家加强了病险水库的除险加固工作,对大量的病险水库进行了除险加固,但还需对除险加固后的病险水库进行综合评价,以评估病险水

库的康复度,保障水库安全和稳定运行^[1-2]。

目前病险水库康复度评价一般采用层次分析法,但该方法难以排除人为主观因素的干扰,判断矩阵的一致性检验较为困难,为此 Zhang 等^[3]和倪九派等^[4]提出了模糊综合评价的方法,并将其分别应用于水库诱发地震风险和区域土地开发整理潜力的评价中。模糊综合评价法虽然将熵权法和层次分析

法分别应用在不同评价指标体系层,但没有对整体评价进行组合赋权。王丽珍等^[5]提出了基于主客观组合赋权法的评价方法,并运用于巴彦淖尔市生命体的研究中,但其评价过程中各过渡段的评价难以定量表示。邹志红等^[6]提出采用熵权法挖掘数据自身所携带的信息,但熵权法本身不能体现评价指标重要性的差异,评价的可靠性较低。Fan 等^[7]将层次分析法和模糊评价法结合应用于大坝防渗帷幕灌浆效果的评价,但仅考虑了一层评价体系,评价的准确性不足。

本文将模糊灰色聚类法与组合赋权法相结合,根据灰色聚类理论对病险水库各康复类型评价指标的康复度分级,采用熵权法和层次分析法对评价指标组合赋权,通过模糊灰色聚类法评价各康复类型的康复度,实现病险水库康复度的量化评估。

1 模糊灰色聚类法和组合赋权法

1.1 模糊灰色聚类法

为分析病险水库除险加固效果,建立病险水库康复度综合评价的指标体系,对各康复类型进行康复度评价(第一层评价),然后对病险水库康复度进行综合评价(第二层评价)。通过建立层次化(两层)的指标体系,可将一个复杂的评价体系简化,同时使得评价结果准确性和可靠性更高。

模糊灰色聚类法是模糊综合评价和灰色系统理论的结合^[8-11],先利用灰色聚类法对各康复类型进行第一层评价,再通过模糊综合评价对病险水库康复度进行综合评价^[12]。该方法可兼顾灰色聚类法和模糊综合评判法的优点,评价结果更准确合理。通过综合考虑康复度评价指标,对病险水库除险加固后所处的状态做出定性分析和定量计算,量化分值可直接反映除险加固后水库的康复度,评价的结果简单直观。

1.2 组合赋权法

熵权法^[13]是一种客观的赋权方法,直接由输入的评价指标值来确定评价指标的权重^[13-15]。设有 m 个评价指标, n 个评价对象,则可以得到 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ 的原始数据矩阵,然后通过标准化处理得到评价矩阵 $P = [p_{ij}]_{m \times n}$,其中 p_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个评价指标上的标准值,其取值范围为 $[0, 1]$ 。

根据各评价指标所提供的数据信息量,熵权法能通过计算得到一个综合指标。熵权本身不能表示某个评价指标在决策中的权重,但在给定评价对象的评价指标值后,通过各指标相互之间竞争的激烈程度来反映某个评价指标在评价系统中对决策提供有效信息量的多寡程度,评价指标的信息熵越小,表明其竞争的优势越大,提供的信息越丰富,在评价系统中所占的权重越大。

层次分析法是一种定量与定性相结合的评价方法^[11,15-16],广泛应用于病险水库康复度综合评价中,由专家根据经验判断两两指标间的重要性程度(一般采用 $1 \sim 9$ 标度),构建判断矩阵 A ,在检验判断矩阵的一致性后,确定各指标的权重。

熵权法和层次分析法在确定权重时都存在一定的局限性,采用组合赋权的方法将两者有机结合,使得到的权重能反映主客观的影响,可兼顾两种方法的优点又避免了两种方法的不足,使评价指标的权重更加科学合理。设 w_j 为第 j 个评价指标的组合赋权值,用 w'_j 和 w_j^* 的线性组合表示 $w_j (j = 1, 2, \dots, m)$,其计算公式为

$$w_j = (1 - \alpha)w'_j + \alpha w_j^* \quad (1)$$

式中: w'_j 为层次分析法确定的指标权重; w_j^* 为熵权法确定的指标权重; α 为熵权法权重在组合赋权中所占的比例,为了减少人为主观因素的干扰,其值采用变异系数法^[5]赋值,计算公式为

$$\alpha = \frac{q}{q-1} \left[\left(\frac{2}{q} (w'_1 + 2w'_2 + \dots + qw'_q) - \frac{q+1}{q} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $w'_1, w'_2, \dots, w'_q$ 为层次分析法确定的指标权值从小到大的重新排列; q 为层次分析法的评价指标数。

2 病险水库康复度评价模型

2.1 评价指标体系的建立及量化

影响病险水库康复度的因素很多,考虑所有的因素显然不切实际,在对已有研究成果^[17]分析的基础上,构建递阶层次结构的评价指标体系如图 1 所示。评价指标可以分为两个层次,第一层为病险水库各康复类型的评价指标,第二层为病险水库康复度综合评价的各康复类型。运行管理和金属结构安全康复类型需要定性的对比给出,而防洪能力、结构安全、渗流安全及抗震安全康复类型可定量计算求解,评价结果的等级划分参考已有研究成果^[16]。

对于定性指标 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_{17}, C_{18}$,由专家根据经验给出加固前后水库运行状况并赋分;对于定量指标 $C_5 \sim C_{16}$,依据病险水库除险加固前后的典型剖面图,建立二维有限元模型,分析计算得到各定量指标,再采用曲线型无量纲化方法^[18]处理。病险水库康复过程是一个动态、非线性的变化过程,病险水库安全性态变化具有 Logistic 生长曲线的特征^[19],基于病险水库加固前后的 Logistic 量化值,可计算水库的康复度提升系数 D ^[20]。

Logistic 模型的常用表达式为

$$S = \frac{0.9861}{1 + 0.9581e^{-0.5344(0.2x-10)}} \quad (0 \leq x \leq 100) \quad (3)$$

式中: S 为评价指标安全度; x 为指标评分。

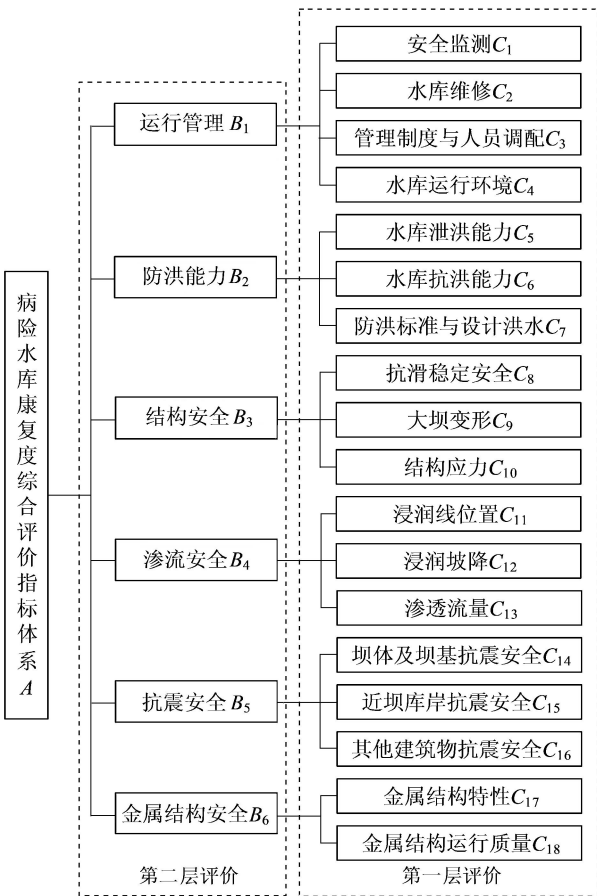


图1 病险水库康复度综合评价指标体系

基于病险水库安全度,采用下式计算康复度提升系数:

$$D = \frac{S_2 - S_1}{S_{\max} - S_{\min}} \tag{4}$$

式中: S_1 为加固前评价指标安全度; S_2 为加固后评价指标安全度; $S_{\max}$ 为评价指标安全度最大值,取 0.9820; $S_{\min}$ 为评价指标安全度最小值,取 0.0045。

2.2 病险水库康复度等级划分

病险水库康复度综合评价结果通过等级划分量化,依据除险加固后水库的运行状态,将康复度划分为 4 个等级,各等级的具体含义如表 1 所示。

表 1 病险水库康复度

康复度等级	分值	除险加固效果
完全成功	[90,100]	除险加固后,各指标参数较规范要求和设计水平有显著提高,除险加固康复效果明显,水库能健康稳定运行
较成功	[80,90)	除险加固后,各指标参数较规范要求和设计水平有明显提高,个别指标提高不明显,水库能正常稳定运行
基本成功	[60,80)	除险加固后,各指标参数较规范要求和设计水平有所提高,部分指标提高不明显,水库能基本正常运行
失败	[0,60)	除险加固后,各指标参数较规范要求和设计水平有一定的差距,除险加固后康复效果不明显,指标没有提高,水库需要继续加固补强

2.3 改进灰色聚类白化权函数构造

常用的白化权函数是基于端点和中心点三角白化权函数^[13,21],但是在处理交叉灰类时常出现聚类系数不为 1 的情况,为此,本文采用改进的三角白化权函数^[22],其处理聚类指标取值范围延拓能力强,交叉灰类的聚类系数之和为 1。病险水库各康复类型评价指标的康复度可划分为 4 个等级(即灰类),将其定义在 $[0,1]$ 中,各灰类的转折点由专家给出,此时,康复度中包含 4 个白化权函数, f_{1j} f_{2j} f_{3j} f_{4j} 分别表示各康复类型康复度等级为“完全成功”“较成功”“基本成功”“失败”。

2.4 病险水库除险加固效果综合评价步骤

步骤 1 输入除险加固后各评价指标提升系数 D 的原始数据,标准化处理后得到评价矩阵 P 。

步骤 2 利用熵权法和层次分析法分别确定病险水库各康复类型评价指标权重,再由组合赋权法将权重值线性叠加,得到病险水库各康复类型评价指标的组合权重 $w_j(j=1,2,\cdots,18)$ 。

步骤 3 基于灰色聚类法得到病险水库各康复类型的综合评价。

步骤 4 构造模糊综合判断矩阵 R ,采用熵权法和层次分析法得到病险水库各康复类型的权重,并将其组合,得到病险水库康复度综合评价指标的权重 W 。模糊综合判断矩阵 R 可由下式求得:

$$\delta_{kip} = \sum_{x_{ij} \in X_p} f_{ij}(x_{ij})w_j \tag{5}$$

式中: δ_{kip} 为评价对象 i 属于康复类型 p 的灰色聚类系数; $f_{ij}(x_{ij})$ 为各白化权函数值; X_p 为康复类型 p 评价指标集合; k 为灰类类数($k=1,2,3,4$)。

步骤 5 由 R 和 W 通过模糊综合评价方法计算病险水库康复度,得到评价结果 H 。

步骤 6 将评价结果 H 转化为表 1 中的评价分值即得到病险水库康复度评价结果。转化公式为

$$F = HL^T \tag{6}$$

其中

$$H = WR \tag{7}$$

式中: F 为病险水库康复度评价量化分值; L 为病险水库康复度各个等级的量化分值矩阵。

3 评价实例

熵权法通过指标的差异来计算指标的客观权重,为了充分体现评价指标间的客观差异,本文以已进行除险加固的河南省的白鸭山水库、虎山水库和江西省的光华水库、仁和水库、石脑水库、丰产水库共 6 座水库为计算样本,用本文提出的模糊灰色聚类-组合赋权法分别定量计算其中 3 座水库除险加固后的康复度,综合评价除险加固效果,另 3 座水库

可采用类似的方法评价。

3.1 原始数据处理

6 座水库均处于低地震烈度带,同时金属结构安全康复度对水库除险加固影响较小,因此不考虑抗震安全和金属结构安全康复度的影响。令 $X_1 = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}\}$ 、 $X_2 = \{x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}\}$ 、 $X_3 = \{x_{i8}, x_{i9}, x_{i10}\}$ 、 $X_4 = \{x_{i11}, x_{i12}, x_{i13}\}$ 分别表示其余 4 种康复类型的原始数据。根据水库除险加固前后的情况,请专家对定性指标打分,由有限元计算得到定量指标值,采用前述评价指标量化方法得到各评价指标除险加固后的康复度提升系数原始数据,经标准化及无量纲化处理后得到规范化数据如表 2 所示。

表 2 病险水库康复度评价指标规范化数据

水 库	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
光华水库	0.951 2	0.934 1	0.906 7	0.897 9	0.912 3	0.923 1	0.904 2
仁和水库	0.905 4	0.890 1	0.753 1	0.954 1	0.852 1	0.887 5	0.854 6
虎山水库	0.813 9	0.843 9	0.756 1	0.875 6	0.754 3	0.801 5	0.842 3
石脑水库	0.966 6	0.948 9	0.922 3	0.904 1	0.878 6	0.944 3	0.864 5
丰产水库	0.786 2	0.827 9	0.864 5	0.813 1	0.901 3	0.954 6	0.897 2
白鸭山水库	0.853 1	0.923 1	0.915 6	0.874 6	0.953 4	0.894 5	0.875 6
水 库	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	
光华水库	0.805 6	0.821 3	0.904 5	0.976 1	0.875 6	0.932 1	
仁和水库	0.854 6	0.734 5	0.753 1	0.884 5	0.732 1	0.864 4	
虎山水库	0.857 2	0.741 3	0.754 0	0.798 1	0.833 1	0.752 4	
石脑水库	0.902 4	0.842 3	0.899 1	0.959 3	0.904 5	0.974 3	
丰产水库	0.921 4	0.890 1	0.874 5	0.912 3	0.773 4	0.894 5	
白鸭山水库	0.954 7	0.764 5	0.820 1	0.823 1	0.894 5	0.853 7	

3.2 权重确定

为了计算病险水库各康复类型评价指标的权重,先对各评价指标进行标准化处理,得到相应的熵权法评价矩阵 P ;请专家根据经验对指标进行两两比较,得到层次分析法判断矩阵 A 。以运行管理类康复度评价指标为例,评价矩阵 P 和判断矩阵 A 如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0.1803 & 0.1740 & 0.1771 & 0.1688 \\ 0.1617 & 0.1720 & 0.1789 & 0.1644 \\ 0.1716 & 0.1658 & 0.1471 & 0.1794 \\ 0.1832 & 0.1768 & 0.1802 & 0.1700 \\ 0.1490 & 0.1542 & 0.1689 & 0.1529 \\ 0.1543 & 0.1572 & 0.1477 & 0.1646 \end{bmatrix}$$
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 2 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

由变异系数法(式(2))确定熵权法和层次分析法计算权重的线性组合系数,通过组合赋权法(式(1))得到各指标的权重。计算得运行管理类 4 个康复度评价指标的 α 值分别为 0.433 2、0.306 5、0.679 2 和 0.526 3,因此运行管理类康复度 5 个评价指标的权

重分别为 0.394 0、0.120 0、0.296 6 和 0.189 4。同理防洪能力、结构安全和渗流安全的评价指标($C_5 \sim C_{13}$)权重分别为 0.503 4、0.394 1、0.102 5、0.178 5、0.632 6、0.188 9、0.485 9、0.279 2 和 0.234 9。

3.3 康复度综合评价

病险水库康复度综合评价分两层评价,第一层对各康复类型进行评价,第二层在第一层的基础上对病险水库康复度进行综合评价。

3.3.1 各康复类型评价指标的评价

由专家依据经验确定 4 个灰类的转折点,进而得到改进的白化权函数,其形式如下:

$$\begin{cases} f_{1j}[-,-,0.5,0.7] \\ f_{2j}[0.65,0.7,-,0.8] \\ f_{3j}[0.75,0.8,-,0.9] \\ f_{4j}[0.85,0.9,-,-] \end{cases} \quad (8)$$

将表 2 中的数据代入式(8),可得到各康复类型评价指标值的白化权函数值,然后利用式(5)计算得光华、仁和和虎山 3 座水库各康复类型评价指标值的灰色聚类结果如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.7538 & 0.2462 & 0 & 0 \\ 0.6573 & 0.3427 & 0 & 0 \\ 0.1030 & 0.6362 & 0.2608 & 0 \\ 0.7502 & 0.2498 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.4558 & 0.2568 & 0.2874 & 0 \\ 0.1631 & 0.8369 & 0 & 0 \\ 0.0082 & 0.1762 & 0.7176 & 0.098 \\ 0.2014 & 0.5193 & 0.2293 & 0.050 \end{bmatrix}$$
$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.0485 & 0.5234 & 0.4281 & 0 \\ 0 & 0.3193 & 0.6807 & 0 \\ 0.0129 & 0.1732 & 0.7589 & 0.055 \\ 0 & 0.4714 & 0.5286 & 0 \end{bmatrix}$$

由模糊综合判断矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 ,可得到 3 座病险水库各康复类型的灰色聚类结果。灰色聚类结果的大小反映其隶属度的强弱,数值最大的决定其隶属类型。各水库除险加固后运行管理、防洪能力、结构安全和渗流安全康复度如表 3 所示。

表 3 各康复类型聚类结果

水 库	B_1	B_2	B_3	B_4
光华水库	完全成功	完全成功	较成功	完全成功
仁和水库	完全成功	较成功	基本成功	较成功
虎山水库	较成功	基本成功	基本成功	基本成功

3.3.2 病险水库康复度综合评价

根据模糊综合评价的判断矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 中的数据,利用熵权法和层次分析法分别求出综合判断矩阵的权重,然后利用式(1)计算组合赋权的权重值 W ,结果如表 4 所示。

表 4 病险水库康复度综合评价权重

水 库	熵权法权重				层次分析法权重				组合权重			
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4
光华水库	0.276	0.254	0.195	0.275	0.183	0.393	0.269	0.155	0.215	0.278	0.248	0.259
仁和水库	0.080	0.520	0.260	0.140	0.080	0.520	0.260	0.140	0.080	0.520	0.260	0.140
虎山水库	0.183	0.381	0.225	0.211	0.134	0.453	0.265	0.148	0.151	0.393	0.254	0.202

病险水库除险加固后所处的状态可通过模糊综合评价公式 $H=R \cdot W$ (“ $\cdot$ ”为模糊评价算子) 求出^[6],利用式(6)量化病险水库除险加固后的健康状态,分别用 95、85、75、65 依次代替 4 个等级所对应的分值,加权求和得到病险水库康复度评价量化分值如表 5 所示。

表 5 病险水库康复度综合评价量化结果

水 库	模糊评价				量化 分值	评价 结果
	完全成功	较成功	基本成功	失败		
光华水库	0.570	0.372	0.059	0	90.1	完全成功
仁和水库	0.167	0.537	0.262	0	83.4	较 成 功
虎山水库	0.011	0.344	0.632	0.014	78.6	基本成功

3.3.3 病险水库康复度综合评价结果分析

由表 5 可知,光华水库各康复类型中仅有结构安全康复效果评价为较安全,其余康复类型康复效果评价都为完全成功,最终得分为 90.1,该水库康复度综合评价为完全成功。仁和水库运行管理康复效果评价为完全成功,防洪能力和渗流安全康复效果评价均为较成功,结构安全康复效果评价为基本成功,最终得分为 83.4,该水库康复度综合评价为较成功,说明除险加固后水库的运行效益有明显的改善,但在结构安全康复效果上还有提升的空间。虎山水库运行管理康复效果评价为较成功,而其余康复类型康复效果评价都为基本成功,防洪能力、结构安全和渗流安全康复效果隶属基本成功的聚类系数分别为 0.6807、0.7589、0.5286,模糊综合评价得分为 78.6,该水库康复度综合评价为基本成功,说明水库除险加固对各康复类型康复度提升有限,需要在后期的运行中对水库采取进一步的加固措施,特别是在防洪能力和结构安全方面,提升水库综合运行水平。3 座水库的评价结果与其加固实际情况及验收意见相吻合,表明本文方法是科学合理的。

4 结 语

本文结合病险水库除险加固特点,构建两层评价体系,提出了模糊灰色聚类与组合赋权相结合的病险水库康复度综合评价方法,可解决病险水库除险加固难以定量评价的难题。将该方法应用于 3 座病险水库除险加固效果的综合评价,结果与水库除险加固实际情况及验收意见结论一致,说明模糊灰

色聚类-组合赋权法可很好地应用于病险水库康复度综合评价,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] 钮新强. 水库病害特点及除险加固技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (1): 153-157. (NIU Xinqiang. Characteristics of reservoir defects and rehabilitation technology in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 153-157. (in Chinese))

[2] GUPTA H K, RASTOGI B K. Dams and earthquakes[M]. Amsterdam: Elsevier, 1976.

[3] ZHANG Q W, ZHONG M. Using multi-level fuzzy comprehensive evaluation to assess reservoir induced seismic risk[J]. Journal of Computer, 2011, 6(8): 1670-1676.

[4] 倪九派, 李萍, 魏朝富, 等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 202-209. (NI Jiupai, LI Ping, WEI Chaofu, et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 202-209. (in Chinese))

[5] 王丽珍, 黄跃飞, 傅旭东. 基于主客观组合赋权法的巴彦淖尔市生命体健康评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(增刊 1): 18-27. (WANG Lizhen, HUANG Yuefei, FU Xudong. Urban vital organism health assessment of the bayannaoer city based on the combination weighting approach of subjective and objective[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(Sup1): 18-27. (in Chinese))

[6] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (4): 552-556. (ZOU Zhihong, SUN Jinnan, REN Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25 (4): 552-556. (in Chinese))

[7] FAN G C, ZHONG D H, YAN F, G, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for curtain grouting efficiency assessment based on an AHP method extended by D numbers[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 44: 289-303.

- [8] 庞博,李玉霞,童玲. 基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 185-188. (PANG Bo, LI Yuxia, TONG Ling. Application of grey clustering method and fuzzy comprehensive assessment method to assess eutrophication level of water [J]. Environment Science and Technology, 2011, 34(11):185-188. (in Chinese))
- [9] 崔建国,傅康毅,陈希成,等. 基于灰色模糊与层次分析的多属性飞机维修决策方法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 478-486. (CUI Jianguo, FU Kangyi, CHEN Xicheng, et al. Multiple attribute maintenance decision making of aircraft based on grey-fuzziness and analytical hierarchy process [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2):478-486. (in Chinese))
- [10] 张小飞,苏国韶,吴敦彰. 基于层次模糊综合评价的水库大坝安全评价法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2009, 34(3): 321-325. (ZHANG Xiaofei, SU Guoshao, WU Zhongdun. A new safety evaluation method on dams based on analytic hierarchy process and fuzzing mathematics theory [J]. Journal of Guangxi University (Nature Science), 2009, 34(3):321-325. (in Chinese))
- [11] 胡龙萍,徐晓凤. 基于灰色聚类的汽车健康状态评估[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(10): 216-220. (HU Longping, XU Xiaofeng. Automobile health status assessment based on gray clustering [J]. Computer Technology and development, 2014, 24(10): 216-220. (in Chinese))
- [12] 张秋文,章永志,钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 87-95. (ZHANG Qiuwen, ZHANG Yongzhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 87-95. (in Chinese))
- [13] CHENG T, ZHANG C X. Application of fuzzy AHP based on entropy weight to site selection of solid sanitary landfill [J]. Environment and Sanitary Engineering, 2003, 12(2): 61-67.
- [14] 张凯,沈洁. 基于萤火虫算法和熵权法的水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 50-53. (ZHANG Kai, SHEN Jie. Optimal allocation of water resources based on firefly algorithm and entropy method[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 50-53. (in Chinese))
- [15] 俞科,余文学. 基于 AHP-熵权法的水库移民安置效果评价[J]. 水利经济, 2013, 31(3): 65-68. (YU Ke, YU Wenxue. Evaluation of effectiveness of reservoir resettlement based on AHP entropy method[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013, 31(3): 65-68. (in Chinese))
- [16] 向欣,罗煜,程红胜,等. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 205-212. (XIANG Xin, LUO Yu, CHENG Hongsheng, et al. Biogas engineering technology screening based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 205-212. (in Chinese))
- [17] 王宁,沈振中,徐力群,等. 基于模拟退火层次分析法的病险水库除险加固效果评价[J]. 水电能源科学, 2013(9): 65-67. (WANG Ning, SHEN Zhenzhong, XU Liquan, et al. Reinforcement effect evaluation of dangerous reservoir based on simulated annealing-analytic hierarchy process [J]. Water Resources and Power, 2013(9): 65-67. (in Chinese))
- [18] 吴焕新. 病险水库除险加固治理效果综合评价体系研究[D]. 济南:山东大学, 2009.
- [19] 李雷. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [20] 张计. 土石坝安全与除险加固效果量化评价体系研究[D]. 武汉:长江科学院, 2011.
- [21] 李亚松,张兆吉,费宇红,等. 改进的灰色聚类法在地下水质量评价中的应用[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 25-28. (LI Yasong, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Application of an improved grey clustering method to groundwater quality evaluation [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(5): 25-28. (in Chinese))
- [22] 刘思峰,谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-250. (LIU Sifeng, XIE Naiming. New grey evaluation method based on reformative triangular whitenization weight function [J]. Journal of System Engineering, 2011, 26(2): 244-250. (in Chinese))

(收稿日期:2017 -05 -15 编辑:熊水斌)

