

基于改进云模型的堤坝除险加固效益后评价研究

刘展志¹, 黄显峰¹, 方国华¹, 黄雪晴¹, 陈颖钦²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要: 针对堤坝除险加固效益后评价,从经济、社会、生态环境效益3方面构建效益评价指标体系,该体系包括防洪增量效益、灌溉增量效益、经济内部收益率、水环境影响等15项指标,确定效益极佳、较好、一般、较差、极差5个评价等级及相应标准,提出改进云模型进行综合评价。该模型将投影追踪法和熵权法计算得到的客观权重与云模型计算的初始权重相耦合,利用组合评价法计算指标权重,根据指标等级与标准计算云模型的3个特征值(期望 Ex ,熵 En ,超熵 He),采用条件云发生器计算各指标的隶属度,进行综合评价。将上述方法应用于湖北省黑湾水库堤坝除险加固效益后评价,验证了改进云模型评价方法的有效性和适用性。

关键词: 堤坝; 效益后评价体系; 改进云模型; 投影追踪; 熵权法

中图分类号:TV698.2⁺3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)05-0223-09

Post benefit evaluation of dam reinforcement based on modified cloud model

LIU Zhanzhi¹, HUANG Xianfeng¹, FANG Guohua¹, HUANG Xueqing¹, CHEN Yingqin²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hohai University Wentian College, Ma'anshan 243031, China)

Abstract: Aiming at the post benefit evaluation of reservoir reinforcement, the evaluation system of benefit index is built from the economic, social and ecological aspects. The system includes 15 indexes, such as flood control increment benefit, irrigation increment benefit, economic internal rate of return, and water environmental impact. Five evaluation grades and criteria are determined, which are excellent, good, general, bad and disappointing. The modified cloud model(MCM) is brought to calculate comprehensive evaluation. The model combines objective weights calculated by projection pursuit method and the entropy method and initial weights calculated by cloud model(CM), and the index weights are computed by the combination evaluation method. The three characteristic values (Expected value Ex , Entropy En , Hyper Entropy He) of the CM are calculated according to the index grade and standard, and the rank of each index grade can also be calculated by condition cloud generator for comprehensive evaluation. The above method is applied to the evaluation of the reinforcement benefit of the dam in Heiwan Reservoir of Hubei Province, and the validity and applicability of the improved cloud model evaluation method are verified.

Key words: dam; post benefit evaluation system; modified cloud model; projection pursuit method; entropy method

1 研究背景

根据《第一次全国水利普查公报》,我国共有水库98 002座,总库容 $9323.12 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中已建水库97 246座,总库容 $8 104.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,在建水库756

座,总库容 $1 219.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1]。水库在防洪、发电、供水等方面发挥着巨大的作用,但由于建设年代久远、管理维护不到位、自然灾害等原因导致我国存在大量病险水库。而这些病险水库的存在不仅阻碍水库的正常运行,还对下游城市设施和人民安全有

收稿日期:2017-05-24; 修回日期:2017-07-13

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0400909);湖南省水利科技重点项目([2016]194-21);湖南省水利科技项目([2015]245-13);安徽高校自然科学基金项目(KJ2017A898);

作者简介:刘展志(1994-),男,浙江台州人,在读硕士研究生,研究方向为水资源规划水利经济。

通讯作者:黄显峰(1980-),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事水资源规划、水库调度与水利经济研究。

巨大威胁。近年来,我国高度重视病险水库相关问题,进行除险加固工作,并在中央补助项目中开展了专项整治^[2]。目前,各地水库堤坝相关除险加固工作陆续完成,但部分水库堤坝整治不合格。因此,还需要对已完成除险加固项目的工程重新评价,对于未满足评价要求的水库要做进一步的治理。

国外对水库堤坝除险加固的研究较少,主要是研究其出现风险灾害的原因及机制^[3-4]。国内学者近年来在水库堤坝除险加固方面进行了一些研究。钮新强^[5]总结水库相关病害及其特点并介绍了各类除险加固技术;姚艳杰^[6]把风险分析理论与水库堤坝除险加固相结合,建立风险模型,进行了风险评估分析;胡江等^[7]采用生命质量指数,通过风险效益分析计算溃坝损失和增量收益;王宁等^[8]建立除险加固效果评价体系,通过模拟退火层次分析法计算指标进行评价;徐冬梅等^[9]对震损水库进行研究,通过模糊聚类分析法确定水库加固顺序。这些方法中有的数据要求高、权重较难确定,有的定性成分过多、主观性强。组合评价法是将几种评价方法进行组合,通常选择将主观赋权和客观赋权相结合,一定程度上避免了主观的随意性同时又具有一定的倾向性。云模型是一种新的评价方法,该方法兼具模糊性和随机性,比较客观精确,能够较好实现定性定量之间的转化。李影^[10]以变形、渗流、环境3方面构建评价体系,通过组合赋权和正态云进行大坝安全评估计算;侯炳江^[11]组合赋权-云模型应用于水质评价,也取得了较好的成果,但他们在计算组合权重时均采用博弈论建立模型,各自方法本身的权重矩阵无法很好确定。运用云模型计算权重时,由于初始权重的选择往往具有较强的主观性,本文通过组合权重来改进云模型,并通过条件云模型进行各指标隶属度的计算,能够客观全面体现病险水库堤坝除险加固后的工程效益,便于调整堤坝治理方案。

2 效益后评价指标体系

2.1 指标体系构建

水库建设能够发挥防洪、灌溉、发电、水产饲养等作用,但病险水库可能会给社会带来严重危害。我国目前进行堤坝除险加固效益后评价时往往参照大坝水库相关规范标准,还没有建立自成体系的评价系统。一般病险水库堤坝除险加固效益后评价应包括治理方案、工程质量、施工技术、运行维护管理、综合治理效果等方面^[12]。对堤坝治理进行效益后评价能作为工程依据,并具有一定的指导意义,同时

也是治理工作的前提与基础,能够帮助治理方案的建立和改进。由于资料限制,本文指标体系建立主要从经济影响、社会影响与环境的影响3大方面建立效益后评价指标体系^[13],具体见表1。

2.2 评价等级与标准

本文将评价体系根据效益评价分为5个等级,分别是效益极佳(I)、较好(II)、一般(III)、较差(IV)、极差(V),考虑各地区发展程度不同,差异较大,对定量指标以实测值与预期值的比值作为评判该指标达到预期效益的程度,然后确定合理的等级范围阈值,并采用置信度计算最终评价结果,具体分级等级与标准见表2。

3 改进云模型评价

云模型是一种兼具模糊性和随机性的定性与定量转换模型,通过具有一定随机性的样本点的值分析计算样本的关联性、模糊性以及随机性^[14],由3个特征值(期望 Ex ,熵 En ,超熵 He)通过云发生器来实现样本定性和定量之间的转换。云模型不仅可以分析求解指标权重,也可以计算指标等级^[15]。云模型中的云发生器一般包括正向、逆向和条件云发生器3种,具体流程见图1、2、3。

3.1 改进云模型求指标权重

3.1.1 云模型计算初始权重 云模型可以通过先用逆向云发生器根据初始权重求得3个特征值,再用正向云发生器补充云滴获得权重^[16],其具体计算步骤如下:

(1) 收集一定数量专家各自的初始权重评价。

(2) 通过逆向云发生器求解 Ex 、 En 、 He 。

根据样本值 x_i 和样本数 n 求 Ex 与样本方差 S^2 。

$$Ex = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Ex)^2}{n - 1} \quad (2)$$

根据样本均值求熵 En :

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - Ex|^2}{n}} \quad (3)$$

根据样本方差和熵求超熵 He :

$$He = \sqrt{S^2 - En^2} \quad (4)$$

(3) 根据所求的 Ex 、 En 、 He ,用正向云发生器补充云滴,再求均值即可得到权重,假设重复生成的云

滴数 $N = 1\ 000$ 。先求正态随机数 En' :

$$En' = \text{randn}(1) \times He + En \quad (5)$$

再求正态随机数 Ex'_i :

$$Ex'_i = \text{randn}(1) \times En' + Ex \quad (6)$$

最后确定度 μ_i :

$$\mu_i = e^{-\frac{(Ex'_i - Ex)^2}{2En'^2}} \quad (7)$$

重复 1000 次,得到 1000 个云滴 (Ex'_i, μ_i) ,再求均值即可得到各个指标的权重。

表 1 堤坝除险加固综合效益后评价体系

体系	序号	指标	指标含义
经济 效益 B ₁	1	防洪增量效益 C ₁	堤坝经过治理后增加的防洪能力,在避免洪灾损失方面的潜在效益
	2	灌溉增量效益 C ₂	堤坝经过治理后增加的灌溉能力,在农业灌溉方面增加的潜在效益
	3	经济净现值 C ₃	通过社会折现率将项目在总计算期内各年净效益均折算到计算期初的现值总和
	4	经济内部收益率 C ₄	计算期内的经济净现值累积达到零时的折现率
	5	经济效益费用比 C ₅	项目效益现值与项目费用现值的比值
	6	投资回收期 C ₆	项目净效益能够偿还全部投资所需要的时间
社会 效益 B ₂	7	单位保护面积投资 C ₇	总投资与堤坝保护面积的比值
	8	单位保护人口投资 C ₈	总投资与堤坝保护人口的比值
	9	水资源利用率 C ₉	新增灌溉面积与地区总耕地面积的比值
	10	社会稳定 C ₁₀	社会稳定的促进水平,是一个定性指标
	11	居民生活质量 C ₁₁	居民生活质量提高水平,是一个定性指标
	12	就业效益 C ₁₂	工程提供就业人数的总投资比值
生态环 境效益 B ₃	13	水环境影响 C ₁₃	对水环境的影响程度,是一个定性指标
	14	生态平衡 C ₁₄	对生态平衡的影响程度,是一个定性指标
	15	水土流失量 C ₁₅	工程治理中造成的土壤流失和侵蚀数量

表 2 堤坝除险加固综合效益后评价等级与标准

序号	体系	指标	评价等级				
			效益极佳 (I)	效益较好 (II)	效益一般 (III)	效益较差 (IV)	效益极差 (V)
经济 效益 B ₁	1	防洪增量效益 C ₁	[2,2.5]	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	[0,0.5)
	2	灌溉增量效益 C ₂	[2.2,2.5]	[1.7,2.2)	[1,1.7)	[0.7,1)	[0,0.7)
	3	经济净现值 C ₃	[1.6,1.9]	[1.3,1.6)	[1,1.3)	[0.6,1)	[0,0.6)
	4	经济内部收益率 C ₄	[2,2.5]	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	[0,0.5)
	5	经济效益费用比 C ₅	[1.8,2.2]	[1.4,1.8)	[1,1.4)	[0.6,1)	[0,0.6)
	6	投资回收期 C ₆	[0,0.5]	[0.5,1)	[1,1.5)	[1.5,2)	[2,2.5)
社会 效益 B ₂	7	单位保护面积投资 C ₇	[0,0.5]	[0.5,1)	[1,1.5)	[1.5,2)	[2,2.5)
	8	单位保护人口投资 C ₈	[0,0.5]	[0.5,1)	[1,1.5)	[1.5,2)	[2,2.5)
	9	水资源利用率 C ₉	[2,2.5]	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	[0,0.5)
	10	社会稳定 C ₁₀	[4,5]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
	11	居民生活质量 C ₁₁	[4,5]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
	12	就业效益 C ₁₂	[2,2.5]	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	[0,0.5)
生态环 境效益 B ₃	13	水环境影响 C ₁₃	[4,5]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
	14	生态平衡 C ₁₄	[4,5]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
	15	水土流失量 C ₁₅	[0,0.6]	[0.6,1)	[1,1.4)	[1.4,1.9)	[1.9,2.3)

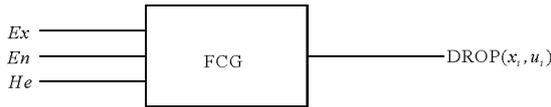


图1 正向云发生器

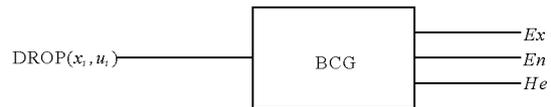


图2 逆向云发生器

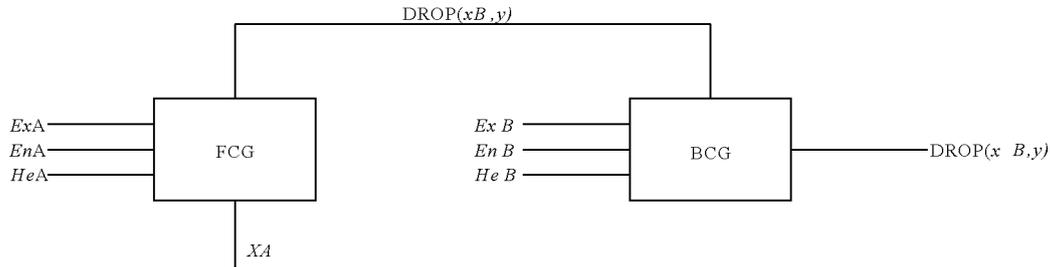


图3 单条件单规则云发生器

虽然云模型本身并不属于主观评价,但在一般的云模型求解权重时,往往采用一些较为主观的方法获取初始权重,使云模型带有较强的主观性。组合赋权法中通常将主观赋权与客观赋权进行有机结合,是一种比较科学合理的方法^[17]。本文选择将熵权法^[18]、投影寻踪法^[19]与云模型结合,使求得的权重更客观合理。

3.1.2 熵权法计算权重 本文采用的熵权法具体计算步骤如下:

(1)根据已有的观测资料,将其规范化后得到初始矩阵 $R = (r_{jk})_{m \times n}$ (m 为样本个数, n 为评价指标个数, r_{jk} 为第 j 个评价对象的第 k 个评价指标的标准化值)。

(2)计算各个评价指标的熵:

$$H_i = - \left(\frac{1}{\ln n} \right) \sum_{k=1}^n (f_{jk} \ln f_{jk}) \quad (8)$$

$$f_{jk} = \frac{r_{jk}}{\sum_{k=1}^n r_{jk}} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中:若 $f_{jk} = 0$,则取 $\ln f_{jk} = 0$ 。

(3)计算各指标权重:

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: $0 \leq \omega_j \leq 1$,同时满足 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

3.1.3 投影寻踪法计算权重 本文采用基于实数编码的加速遗传算法(RAGA)来计算最优投影方向,其最优个体就是所求权重。其计算步骤如下:

(1)根据已有观测资料,经过规范化处理得到初始矩阵 $R = (x_{ij})_{m \times n}$ (m 为样本个数, n 为评价指标个数, x_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个评价指标的标准

化值)。

(2)构造投影指标函数,设 $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为单位投影方向向量,将初始指标投影到 a 得到一维线性空间投影值 Z_i :

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

投影函数 $Q(a)$:

$$Q(a) = S(a) \times d(a) \quad (12)$$

$S(a)$ 为 Z_i 的标准差, $d(a)$ 为 Z_i 的局部密度,其公式分别为:

$$S(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2}{m - 1}} \quad (13)$$

$$d(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (R - r_{ij}) \times f(R - r_{ij}) \quad (14)$$

式中: \bar{z} 为 z_i 的均值; R 为局部密度窗口半降,通常取值 $R = 0.1S(a)$; r_{ij} 表示样本间距离, $r_{ij} = |Z_i - Z_j|$; $f(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数,当 $(R - r_{ij}) \geq 0$ 时取 1,其他则取 0。

(3)优化投影函数

构造适应度函数:

$$\max Q(a) = S(a) \times d(a) \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \quad (16)$$

通过 RAGA 求解,重复 50 次,取其各代最优个体的平均值为权重。

3.1.4 组合评价计算权重 本文通过遗传算法求解组合权重^[20],生成随机种群,使其与各评价方法所求得的权重差值的平方最小。构造适应度函数:

$$\min f(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |Y(i,j) - Z(j)|^2 \quad (17)$$

$$s. t. \sum_{j=1}^n Z(j)^2 = 1 \quad (18)$$

式中: $Y(i, j)$ 表示第 i 种方法第 j 个评价指标的权重; $Z(j)$ 为随机生成的第 j 个评价指标的权重; m 为评价方法个数; n 为评价指标个数。

3.2 基于条件云模型的指标隶属度计算

在求指标等级的过程中主要是通过 X 条件云发生器来计算各指标评价等级,具体步骤:

(1) 确定评价目标指标值 X 与评价指标等级标准 S ;

(2) 计算 3 个特征值并根据正反向指标求解各个指标在各等级下的隶属度^[21]:

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \frac{S_{ij,max} + S_{ij,min}}{2} \\ En_{ij} = \frac{S_{ij,max} - S_{ij,min}}{6} \\ He = C \end{cases} \quad (19)$$

式中: $S_{ij,max}$ 、 $S_{ij,min}$ 分别是第 i 个指标在第 j 个等级中的上、下限; Ex_{ij} 、 En_{ij} 表示第 i 项指标在 j 评价等级中的期望和熵; He 表示超熵,一般情况由实验或经验取值,反映变量不确定程度,本文取 He 值为 0.01,取云滴数 $m = 1\ 000$ 。

本文对 3 个特征值的取值做出部分修正,对下边界取 $Ex_{ij} = 0$,对上边界取 $Ex_{ij} = S_{ij,max} + S_{ij,min}$,同时取熵 $En_{ij} = \frac{S_{ij,max} - S_{ij,min}}{3}$ 。

求正态随机数 En_{ij}' :

$$En_{ij}' = \text{randn}(1) \times He + En_{ij} \quad (20)$$

1) 正向指标:

当 $Ex_{iN} \leq x_i \leq Ex_{i1}$ 时:

$$\mu_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - Ex_{ij})^2}{2En_{ij}'^2}}, j = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

当 $x_i > Ex_{i1}$ 时:

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ \mu_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (22)$$

当 $x_i < Ex_{iN}$ 时:

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & j = N \\ \mu_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (23)$$

2) 反向指标:

当 $Ex_{i1} \leq x_i \leq Ex_{iN}$ 时:

$$m_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - Ex_{ij})^2}{2En_{ij}'^2}}, j = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

当 $x_i < Ex_{i1}$ 时:

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ \mu_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (25)$$

当 $x_i > Ex_{iN}$ 时:

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & j = N \\ \mu_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (26)$$

对每个样本重复 1 000 次求出 $U = (\mu_{ij1}, \mu_{ij2}, \dots, \mu_{ij1000})$ 最后的确定度:

$$\mu_{ij}(x) = \frac{\sum_{k=1}^m \mu_{ijk}}{M} \quad (27)$$

$$\mu_{ij}^* = \frac{\mu_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^5 \mu_{ij}(x)} \quad (28)$$

本文通过置信度准则评判法进行评价等级评判,第 i 个指标的评价等级为:

$$h_i = \min_{g^*} \{g^* \mid \sum_{g=1}^{g^*} \mu_{ijg}^* > \lambda\} \quad (29)$$

整体评价等级评判:

$$h = \min_{g^*} \{g^* \mid \sum_{g=1}^{g^*} \mu_{ijg}^* > \lambda\} \quad (30)$$

式中: λ 为置信度,一般取值在 $[0.5, 0.7]$,若 λ 取值越大则越保守。

3.3 改进云模型计算步骤

改进云模型的具体计算步骤如图 4 所示。

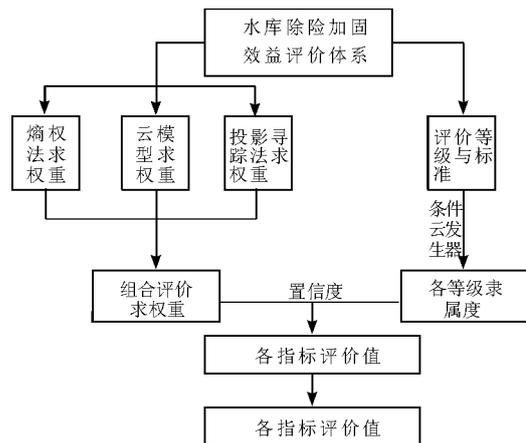


图 4 改进云模型评价计算过程

4 实例研究

4.1 工程概况

黑湾水库位于湖北省宜昌市,水库承雨面积达 0.76 km^2 ,为 V 等小(2)型水库,是一座以灌溉为主,兼具防洪、养殖等多种用途的水库。水库运行期间暴露出许多安全隐患,如坝顶、心墙高度未达标,溢洪道建设未完成,大坝上游坡道未护砌,浪坎、下游坡道未平整,排水反滤设备未整修,被鉴定为三类坝。为确保水库能安全运行,对大坝心墙做加高处

理、对溢洪道进行修改扩建、重新设计修建斜拉式进水口以及启闭机房,实施了多项水库坝险加固工程。具体指标参数见表3。

4.2 指标权重计算

云模型计算出的各子系统权重占比与各个指标在各子系统中权重如图5~8所示。

由图5~8可知,各指标体系的模拟权重呈正态分布,通过求均值来求出对应的权重结果见表4。

表3 堤坝除险加固综合效益评价指标

体系	指标	指标值
经济效益 B ₁	防洪增量效益 C ₁	10 万元
	灌溉增量效益 C ₂	9 万元
	经济净现值 C ₃	20 万元
	经济内部收益率 C ₄	10.6%
	经济效益费用比 C ₅	1.13
	投资回收期 C ₆	9.4 a
社会效益 B ₂	单位保护面积投资 C ₇	0.6435 万元/hm ²
	单位保护人口投资 C ₈	0.0197 万元/人
	水资源利用率 C ₉	24.364%
	社会稳定 C ₁₀	3.7
	居民生活质量 C ₁₁	2.4
	就业效益 C ₁₂	0.3391 人/万元
生态环境效益 B ₃	水环境影响 C ₁₃	2.1
	生态平衡 C ₁₄	2.8
	水土流失量 C ₁₅	50.6 t

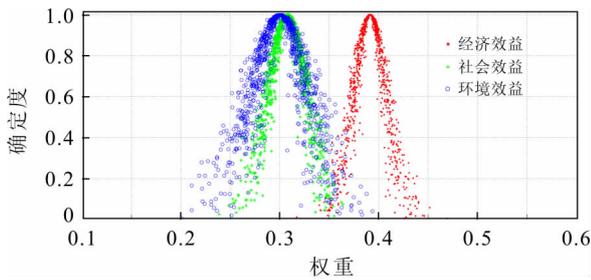


图5 堤坝除险加固体系统权重图

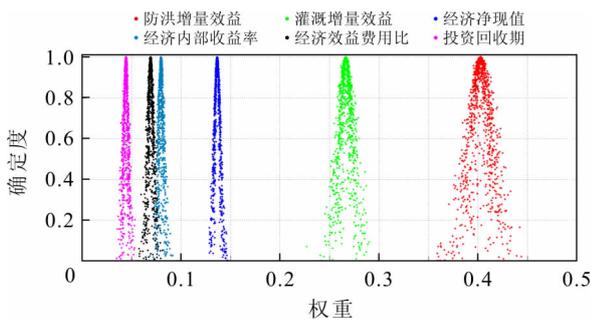


图6 经济效益子系统指标权重图

由图5~8和表4可知,单纯用云模型进行权重

计算时,由于各指标赋权时带有较强的主观倾向性,导致各指标权重差距较大,个别指标如投资回收期、居民生活质量、就业效益等指标占比偏低,无法客观科学地求出权重。故本文通过组合评价法改进云模型,投影寻踪法、熵权法以及最终的组合评价计算出的权重见表5。

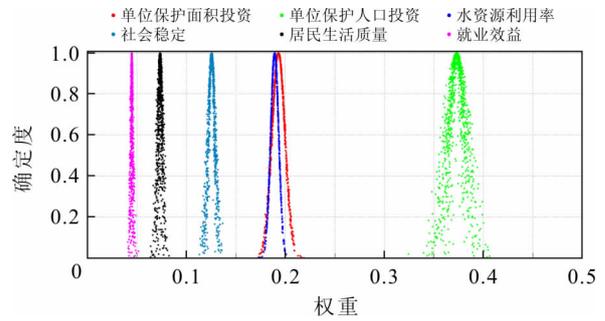


图7 社会效益子系统指标权重图

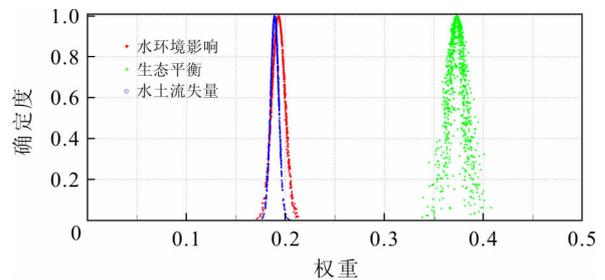


图8 生态效益子系统指标权重图

表4 云模型确定指标权重

指标体系	期望 E_x	熵 E_n	超熵 He	在子体系中的权重 u	整体权重 u^*
经济效益 B ₁	0.392	0.017	0.004	0.391	0.391
防洪增量效益 C ₁	0.403	0.009	0.005	0.403	0.158
灌溉增量效益 C ₂	0.267	0.006	0.003	0.267	0.104
经济净现值 C ₃	0.137	0.003	0.001	0.137	0.053
经济内部收益率 C ₄	0.080	0.002	0.001	0.080	0.031
经济效益费用比 C ₅	0.069	0.003	0.001	0.070	0.027
投资回收期 C ₆	0.045	0.002	0.001	0.044	0.017
社会效益 B ₂	0.308	0.020	0.004	0.309	0.309
单位保护面积投资 C ₇	0.193	0.007	0.001	0.193	0.060
单位保护人口投资 C ₈	0.373	0.008	0.004	0.373	0.115
水资源利用率 C ₉	0.189	0.004	0.001	0.189	0.059
社会稳定 C ₁₀	0.126	0.003	0.001	0.126	0.039
居民生活质量 C ₁₁	0.074	0.002	0.001	0.074	0.023
就业效益 C ₁₂	0.045	0.001	0.001	0.045	0.014
生态环境效益 B ₃	0.301	0.029	0.008	0.300	0.300
水环境影响 C ₁₃	0.266	0.027	0.004	0.267	0.080
生态平衡 C ₁₄	0.434	0.025	0.009	0.434	0.130
水土流失量 C ₁₅	0.300	0.018	0.006	0.299	0.090

由表 5 可知,经过组合评价法改进的云模型求出的各个指标权重相对于单纯云模型的权重有了部分的修正,一些权重较小的指标在组合评价的调整下权重增加,而原本较为重要的指标权重仍然保持其相对优势的权重。

表 5 改进云模型求权重

指标	云模型	熵权法	投影寻踪	组合评价法
防洪增量效益 C_1	0.158	0.083	0.102	0.117
灌溉增量效益 C_2	0.104	0.045	0.070	0.084
经济净现值 C_3	0.053	0.070	0.042	0.043
经济内部收益率 C_4	0.031	0.091	0.060	0.056
经济效益费用比 C_5	0.027	0.070	0.043	0.034
投资回收期 C_6	0.017	0.074	0.042	0.026
单位保护面积投资 C_7	0.060	0.067	0.096	0.082
单位保护人口投资 C_8	0.115	0.076	0.101	0.124
水资源利用率 C_9	0.059	0.098	0.073	0.086
社会稳定 C_{10}	0.039	0.077	0.060	0.058
居民生活质量 C_{11}	0.023	0.072	0.053	0.038
就业效益 C_{12}	0.014	0.051	0.077	0.038
水环境影响 C_{13}	0.080	0.029	0.055	0.038
生态平衡 C_{14}	0.130	0.062	0.099	0.128
水土流失量 C_{15}	0.090	0.035	0.027	0.048

4.3 评价等级计算

通过对边界等级标准的 3 个特征值(期望 E_x ,熵 En ,超熵 He)的改进,本文根据黑湾水库各评价指标的指标值以条件云模型进行隶属度计算,并应

用置信度准则进行指标等级判断,本文的置信度 λ 取 0.6。计算结果见表 6~7。

由表 7 可知,最终堤坝除险加固效益等级属于效益一般等级,达到了预期的效益值,但仍有部分指标未达标,如投资回收期、单位面积保护投资、单位人口保护投资,其评价等级均较差,在以后的治理过程中可以吸取经验,尽量避免再出现此类问题;而水土流失可以通过后续措施进一步整治,如植被种植、工程治理等。

4.4 评价结果分析

由上述权重和隶属度的计算表可知,黑湾水库的除险加固措施取得了一定的成效,其最终效益达到效益一般等级,满足预期效益,但仍存在较大的进步空间,个别指标效益未满足要求,需要在未来进一步加强措施。通过与文献[13]对比发现,其使用遗传算法改进的层次分析法计算权重,其主观性较强,本文采用组合评价改进云模型,使计算的权重更客观科学,同时通过修正云模型的 3 个特征值(期望 E_x ,熵 En ,超熵 He)计算指标隶属度。本文计算出的最终评价等级与其一致,验证了云模型的准确性。

改进云模型的优缺点:通过组合评价法改进的云模型在计算权重时综合考虑了主观倾向性与客观性,其计算方法选取指标权重使其与各评价方法所求得的权重差值平方最小也较好理解。云模型不仅具有模糊性还具有一定的随机性,计算过程中其模拟的数据较多,更加精确可靠。

表 6 条件云模型求各指标隶属度

指标	指标值	评价指标隶属度					置信度评价等级
		效益极佳	效益较好	效益一般	效益较差	效益极差	
防洪增量效益 C_1	1.667	0	0.950	0.050	0	0	II
灌溉增量效益 C_2	1.5	0	0.033	0.967	0	0	III
经济净现值 C_3	1.25	0	0.184	0.810	0.006	0	III
经济内部收益率 C_4	1.33	0	0.046	0.951	0.003	0	III
经济效益费用比 C_5	1.13	0	0.003	0.944	0.053	0	III
投资回收期 C_6	1.175	0	0	0	0	1	V
单位保护面积投资 C_7	1.073	0	0	0	0	1	V
单位保护人口投资 C_8	0.493	0	0	0	0	1	V
水资源利用率 C_9	1.218	0	0.007	0.973	0.020	0	III
社会稳定 C_{10}	3.7	0	0.998	0.002	0	0	II
居民生活质量 C_{11}	2.4	0	0.005	0.969	0.026	0	III
就业效益 C_{12}	1.13	0	0.002	0.910	0.088	0	III
水环境影响 C_{13}	2.1	0	0	0.713	0.287	0	III
生态平衡 C_{14}	2.8	0	0.141	0.858	0.001	0	III
水土流失量 C_{15}	1.446	0	0	0	0	1	V

表7 除险加固整体置信度计算表

指标	指标权重	效益 极佳	指标 置信度	效益 较好	指标 置信度	效益 一般	指标 置信度	效益 较差	指标 置信度	效益 极差	指标 置信度
C_1	0.117	0	0	0.950	0.111	0.050	0.006	0	0	0	0
C_2	0.084	0	0	0.033	0.003	0.967	0.082	0	0	0	0
C_3	0.043	0	0	0.184	0.008	0.810	0.035	0.006	0	0	0
C_4	0.056	0	0	0.046	0.003	0.951	0.053	0.003	0	0	0
C_5	0.034	0	0	0.003	0	0.944	0.032	0.053	0.002	0	0
C_6	0.026	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.026
C_7	0.082	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.082
C_8	0.124	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.123
C_9	0.086	0	0	0.007	0.001	0.973	0.084	0.020	0.002	0	0
C_{10}	0.058	0	0	0.998	0.058	0.002	0	0	0	0	0
C_{11}	0.038	0	0	0.005	0	0.969	0.037	0.026	0.001	0	0
C_{12}	0.038	0	0	0.002	0	0.910	0.034	0.088	0.003	0	0
C_{13}	0.038	0	0	0	0	0.713	0.027	0.287	0.011	0	0
C_{14}	0.128	0	0	0.141	0.018	0.858	0.110	0.001	0	0	0
C_{15}	0.048	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.048
各等级置信度			0		0.202		0.500		0.019		0.279
整体置信度			0		0.202		0.702		0.721		1

通过对边界等级的修正处理,云模型可以更好地处理边界等级隶属度问题。但其本身也存在初始数据要求多、计算较为复杂的缺点。

5 结论

水库堤坝除险加固是近年来水库治理的重点项目,但目前对于堤坝除险加固治理后的效益评价仍比较少。本文从经济影响、社会影响与环境影响三大方面建立效益评价指标体系,并将效益评价分为5个等级,分别是效益极佳、较好、一般、较差、极差,并分别定出各等级标准。同时考虑各地区发展程度不同,差异较大,对定量指标以实测值与预期值的比值作为评判该指标达到预期效益的程度,使该体系应用范围更广。

云模型是一种新的评价方法,该方法兼具模糊性和随机性,比较客观精确,能够较好实现定性定量之间的转化,计算过程中其模拟的数据较多,更加精确可靠。目前云模型在各行各业中都得到广泛应用,但在水利领域的应用还需要进一步的拓展。本文通过熵权法、投影寻踪来改进云模型,以组合评价的方式来计算指标权重,通过条件云发生器计算各指标隶属度,通过对边界等级的修正处理,云模型可

以更好地处理边界等级隶属度问题,是一种十分有效的评价方法,具有良好的推广应用前景。

改进云模型在计算过程中仍存在初始数据要求较多、计算过程较为复杂的缺点,条件云发生器中云模型3个特征值的确定也需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[J]. 中国水利, 2013(7):1-3.
- [2] 杜雷功. 全国病险水库除险加固专项规划综述[J]. 水利水电工程设计, 2003, 22(3):1-5.
- [3] Arslan H, Rosassanchez L. Failure analysis of the granite for a dam foundation[J]. Environmental Geology, 2008, 54(6):1165-1173.
- [4] Okeke A C, Wang Fawu, Mitani Y. Influence of geotechnical properties on landslide dam failure due to internal erosion and piping[C]//. World Landslide Forum 3, Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Beijing, China, 2014-02-06.
- [5] 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.
- [6] 姚艳杰. 水库除险加固效益的风险评估[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
- [7] 胡江, 苏怀智. 基于生命质量指数的病险水库除险加

- 固效应评价方法[J]. 水利学报,2012,43(7):852-859+868.
- [8] 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,2013,31(9):65-67+219.
- [9] 徐冬梅,李璞媛,王文川,等. 基于改进灰色聚类的震损水库等级评价及除险加固顺序[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):173-178.
- [10] 李影. 基于组合赋权-正态云的大坝安全评价模型[J]. 人民黄河,2017,39(4):94-98.
- [11] 侯炳江. 基于组合赋权的水质综合评价云模型及其应用[J]. 水电能源科学,2016,34(8):24-27.
- [12] 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.
- [13] 黄显峰,黄雪晴,方国华,等. 基于GA-AHP和物元分析法的水库除险加固效益评价[J]. 水电能源科学,2016,34(10):141-145.
- [14] 李德毅,刘常昱,杜鹤,等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报,2004,15(11):1583-1594.
- [15] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34.
- [16] 魏光辉,董新光. 基于云模型的区域水资源开发利用评价[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):71-74+80.
- [17] 刘丽,张礼兵,金菊良. 基于遗传算法的组合评价模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(8):899-902.
- [18] 孟宪萌,胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报,2009,40(3):257-262.
- [19] 王芳,冯艳芬,卓莉,等. 基于改进遗传算法投影跟踪的大城市郊区耕地安全综合评价[J]. 热带地理,2013,33(4):373-380+406.
- [20] Peng Tao, Zuo Wanli, Liu Yilin. Genetic algorithm for evaluation metrics in topical web crawling[J]. Computational Methods, 2006(30):1203-1208.
- [21] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报,2013,33(1):251-257.

(上接第222页)

参考文献:

- [1] 郭鹏飞,何建新,刘亮,等. 采用天然砾石骨料的浇筑式沥青混凝土配合比设计及性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):148-150.
- [2] 赵科. 水工沥青混凝土力学性能试验研究[D]. 武汉:长江科学院,2014.
- [3] 谭凡. 沥青混凝土心墙材料力学性能研究[D]. 武汉:长江科学院,2012.
- [4] 张奇. 下坂地坝基混凝土防渗墙与坝体沥青心墙结合面施工技术[J]. 中国水能及电气化,2013(10):2-4+8.
- [5] 许诏君. 沥青混凝土心墙坝心墙与基座接头抗震研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [6] 王晓东. 冶勒水电站大坝心墙与防渗墙连接混凝土基座设计[J]. 水电站设计,2013,29(2):9-11+50.
- [7] 孔宪京,许诏君,邹德高,等. 沥青混凝土心墙坝心墙与基座模型抗震试验研究[J]. 大连理工大学学报,2013,53(4):559-564.
- [8] 张应波. 冶勒水电站沥青混凝土心墙与混凝土基座接头试验研究[J]. 四川水力发电,2003,22(4):45-46+53.
- [9] 中华人民共和国水利部. SL514-2013. 水工沥青混凝土施工规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL501-2010. 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2010.