



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.029

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. XU Dong mei, LI Pu yuan, WANG Wei chuan, et al. Study on damage level and reinforcement sequence of earthquake-damaged reservoirs based on improved grey clustering[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 173-178. (in Chinese)

## 基于改进灰色聚类的震损水库 等级评价及除险加固顺序

徐冬梅, 李璞媛, 王文川, 尹鹏博

(华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450011)

**摘要:** 震损水库的受损类型众多, 涉及因素繁杂且相互关联性较强, 如何在水库受损后快速定损, 以便后续除险加固工作合理有序地开展是非常现实及迫切的问题。针对传统灰色聚类方法中白化权函数选取和聚类原则确定中存在的具体问题, 利用新型混合三角白化权函数的思路, 提出基于改进灰色聚类方法的震损水库分析评价方法, 并将该方法具体应用于四川省震损水库的定损评价。分析评价结果表明, 该方法结构简单, 可快速有效的实现水库震损程度排序, 从而确定震损水库的除险加固顺序及紧要工序。通过多种评价方法对比以及实际震损情况分析可知, 改进的灰色聚类决策方法评价结论可靠, 可较好的运用于震损水库分析评价领域, 对防止地震次生灾害的发生具有重要意义。

**关键词:** 聚类与排序并重; 改进的灰色聚类; 震损水库; 受损级别; 加固顺序

**中图分类号:** TV 697    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0173-06

### Study on damage level and reinforcement sequence of earthquake-damaged reservoirs based on improved grey clustering

XU Dong mei, LI Pu yuan, WANG Wei chuan, YIN Peng bo

(North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Conservancy, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** here are many damage types of earthquake-damaged reservoirs, involving complex factors with strong interconnections. It has become a very realistic and urgent problem as to how to determine the damage quickly after the earthquake, so that the follow-up work on reinforcement can be conducted reasonably and orderly. In view of the specific problems with the selection of whitening weight functions and determination of clustering principles, we adopted the new idea of mixed triangular whitening weight function, put forward a method to analyze and evaluate earthquake-damaged reservoirs based on improved grey clustering, and applied the method to earthquake-damaged reservoirs in Sichuan. Analysis and evaluation results showed that the method has a simple structure, is able to sort the reservoirs by damage level rapidly and effectively, and thereby determine the reinforcement sequence of the reservoirs as well as and the critical procedures. Through comparison of various evaluation methods and analysis of the actual seismic damage, it was drawn that the improved gray clustering method is reliable, and can be well used in the analysis and evaluation of earthquake-damaged reservoirs. It is of great significance for preventing earthquake secondary disasters.

**Key words:** equal stress on clustering and ordering; improved grey clustering; earthquake-damaged reservoirs; damage level; reinforcement sequence

收稿日期: 2016-01-22    修回日期: 2016-09-22    网络出版时间: 2017-01-04  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0920.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509088); 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心开放研究基金(2013CICWP-HN)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51509088); Open Research Fund of the Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Henan Province (2013CICWP-HN).

作者简介: 徐冬梅(1977-), 女, 吉林双辽人, 副教授, 博士, 主要从事水利工程系统分析研究。E-mail: xudongmei@ncwu.edu.cn

灰色理论于 1982 年由邓聚龙教授<sup>[3]</sup>创立,目前灰色理论及灰色聚类决策方法已经被广泛运用于各领域的评价与决策问题<sup>[47]</sup>。灰类白化权函数的选择及确定是灰色聚类的关键环节之一,在灰色聚类决策方法中尤为重要。以往在运用灰色聚类决策方法进行排序和聚类评价时,通常使用上限白化权函数、下限白化权函数、三角白化权函数和梯形白化权函数进行分析<sup>[8]</sup>,这对评判指标优劣的能力有一定影响<sup>[9]</sup>,并进一步影响待评对象的优劣排序,从而影响最终决策结果。且在灰色聚类决策中常采用“最大隶属度原则”,同样可能会产生因某一指标过优或过劣而影响待评对象等级和最终排序的现象,最终常出现排序靠前的不一定是最优,最劣的也不一定排序最靠后的现象<sup>[10]</sup>。

本文提出聚类与排序并重的改进灰色聚类震损水库分析评价方法,在白化权函数选择方面采用半降白化权函数(半降三角白化权函数)、半升白化权函数(半升三角白化权函数)<sup>[11]</sup>和三角白化权函数;聚类原则方面采用综合价值测度作评价,更重新划分了决策标准。改进的灰色聚类中,半升白化权函数和半降白化权函数在实际应用时,克服了传统白化权函数在白化值(白化权函数值)等于 1 的区间内失去判断能力的弊端,提高了判断精度;聚类原则方面回避了“最大隶属度原则”带来的不准确性,把事物当做一个整体,充分考虑其各方面特点,评价结果更为科学,同时以灰类区间综合相对长度对相邻灰类的线性比例,参考综合价值测度权系数确定合理的聚类准则。新方法的提出对开展震损水库险情综合评价指标体系<sup>[12]</sup>、应急除险方案设计<sup>[13]</sup>及最佳除险加固方案选择<sup>[14]</sup>等方面的研究具有重大意义。

## 1 聚类与排序并重的改进灰色聚类决策方法原理及步骤

刘思峰、党耀国等<sup>[8]</sup>在灰色系统理论的基础上提出灰色综合聚类评估方法,强凤娇等<sup>[11]</sup>在此基础上又提出了聚类与排序并重的改进灰色聚类决策方法。改进的灰色聚类决策方法在白化权函数选择方面,用半降白化权函数、半升白化权函数<sup>[11]</sup>和三角白化权函数代替一般灰色聚类中的上限白化权函数、下限白化权函数、三角白化权函数和梯形白化权函数;聚类原则方面,在得到待评价水库的综合隶属度向量以后,设置合理的综合价值测度权系数,经过加权求和得到最终的综合价值测度<sup>[11]</sup>,依照综合价值测度对待评价水库进行分析评价,并利用各指标的取值区间和权重确定综合相对长度,辅以类间综

合价值测度权系数设计新的聚类准则。

本文将聚类与排序并重的改进灰色聚类决策方法应用于四川省震损水库等级评价及除险加固顺序研究中,计算步骤如下。

### (1) 确定灰类。

已知  $i$  个待评价震损水库( $i = 1, 2, \dots, n$ ),各水库有  $j$  个表征震损程度的指标( $j = 1, 2, \dots, m$ ),拟划分为  $k$  个级别( $k = 1, 2, \dots, h$ )。根据级别特征,把指标  $j$  的取值范围划分为相应的  $h$  个灰类,各灰类的取值区间为  $[x_j^1, x_j^2], [x_j^2, x_j^3], \dots, [x_j^h, x_j^{h+1}]$ 。

### (2) 确定白化权函数。

白化权函数的选择是改进的灰色聚类关键步骤之一,对第 1 个灰类采用半降白化权函数,第  $h$  个灰类采用半升白化权函数,其余中间各个灰类采用经典三角白化权函数,计算公式如下。

第 1 个灰类:

$$f_j^1(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{\lambda_2 - x_{ij}}{\lambda_2 - \lambda_1}, & x_{ij} \in [\lambda_1, \lambda_2) \\ 0, & x_{ij} \notin [\lambda_1, \lambda_2) \end{cases} \quad (1)$$

第  $k$  个灰类:

$$f_j^k(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_{k-1}}, & x_{ij} \in [\lambda_{k-1}, \lambda_k) \\ \frac{\lambda_{k+1} - x_{ij}}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, & x_{ij} \in [\lambda_k, \lambda_{k+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

第  $h$  个灰类:

$$f_j^h(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \lambda_h}{\lambda_{h+1} - \lambda_h}, & x_{ij} \in [\lambda_h, \lambda_{h+1}) \\ 0, & x_{ij} \notin [\lambda_h, \lambda_{h+1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\lambda_k$  为指标灰类区间的中心值,根据公式(1)至式(3)分别计算待评价水库各指标的白化权函数  $f_j^k(x_{ij})$ ,归一化得  $g_j^k(x_{ij})$ 。

$$g_j^k(x_{ij}) = \frac{f_j^k(x_{ij})}{\sum_{k=1}^h f_j^k(x_{ij})} \quad (4)$$

### (3) 计算综合聚类系数。

计算待评价水库  $i$  对于  $k$  个灰类的综合聚类系数,见公式(5)。

$$\alpha_i^k = \sum_{j=1}^m g_j^k(x_{ij}) \cdot \omega_j \quad (5)$$

### (4) 计算综合价值测度。

待评价水库  $i$  的综合价值测度用  $v_i$  表示,见公式(6)。

$$v_i = \eta \alpha^T \quad (6)$$

式中:  $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_h)$  是综合价值测度的权系数。

### (5) 分析确定所属灰类。

已知灰类取值区间为  $[x_j^1, x_j^2], [x_j^2, x_j^3], \dots, [x_j^h, x_j^{h+1}]$ , 各指标对于第  $k$  个灰类的相对长度为:

$$d_j^k = \frac{(x_j^{k+1} - x_j^k)}{(x_j^m - x_j^1)} \quad (7)$$

各灰类区间综合相对长度为:

$$d^k = \sum_{j=1}^m d_j^k \quad (8)$$

模型计算分析中:  $v_i \in \left[ \eta_k, \eta_k + \frac{d^1}{d^1 + d^2} (\eta_k - \eta_k) \right]$

时, 待评价水库属于第 1 个灰类;  $v_i \in \left[ \eta_k - \frac{d^k}{d^{k-1} + d^k} (\eta_k - \eta_{k-1}), \eta_k + \frac{d^k}{d^k + d^{k+1}} (\eta_{k+1} - \eta_k) \right]$  时, 待

评价水库属于第  $k$  个灰类;  $v_i \in \left[ \eta_k - \frac{d^k}{d^{k-1} + d^k} (\eta_k - \eta_{k-1}), \eta_k \right]$  时, 待评价水库属于第  $h$  个灰类。

## 2 应用实例

5·12 汶川地震后, 很多水库成为病险水库<sup>[5]</sup>, 取汶川地震后四川省江油市的部分震损水库作为待评价对象。对已知 6 个待评价水库: 新埝河、石音观、罗家槽、左家庙、群力、备战进行等级评价和除险加固顺序研究, 各水库局部震损情况见表 1。

表 1 水库震损详情

Tab. 1 Details of earthquake damaged reservoirs

编号	水库名称	震损情况
1	新埝河	(1) 大坝震损情况: 坝顶震后出现 3 条纵向裂缝, 1 条位于新老坝体结合处, 长 51 m, 最大宽度 8 cm; 1 条位于老坝体, 长 21 m, 宽度 4 cm; 1 条位于上游坝坡, 长 10 m, 宽度 1.5 cm。(2) 溢洪道震损情况: 右岸及底板未护砌, 溢洪道桥震损。(3) 放水洞震损情况: 斜卧管有渗漏, 地震后更加剧了其渗漏程度。
2	石音观	(1) 大坝震损情况: 大坝局部坝坡有明显坍塌。坝体多处出现横向微裂缝, 坝体、坝基有渗漏情况。(2) 溢洪道震损情况: 溢洪道下游段边墙浆砌石边墙护砌振损。(3) 放水洞震损情况: 放水建筑物无明显震损。
3	罗家槽	(1) 大坝震损情况: 大坝并无明显震损。(2) 溢洪道震损情况: 溢洪道本身无明显的震损。溢洪道右侧边墙高处有一滑坡体。溢洪道平直段高处一边坡非常危险, 有坍塌的趋势。(3) 放水洞震损情况: 地震后, 放水建筑物震损严重。坝身内的输水洞可能断裂。放水管出口处坝身已被水流冲损, 且放水管出口处引渠年久失修。
4	左家庙	(1) 大坝震损情况: 大坝坝顶中部位置出现纵向裂缝, 端部有向上游延伸趋势。大坝中部有一条横向裂缝, 贯穿至坝下。由于大坝上游边坡水位变化区受水浪淘刷形成陡立边坡, 使局部陡立边坡存在坍塌之患。(2) 溢洪道震损情况: 溢洪道末端没有消力池。(3) 放水洞震损情况: 放水管轻微卧管震损。
5	群力	(1) 大坝震损情况: 大坝坝体出现纵向裂缝; 上游坡出现裂缝; 坝体出现渗漏。(2) 溢洪道震损情况: 溢洪道完好。(3) 放水洞震损情况: 地震后, 放水管卧管震损, 且年久失修操作不方便。
6	备战	(1) 大坝震损情况: 大坝坝顶中部位置出现纵向裂缝, 缝长 130~140 m, 缝宽 10~30 cm, 探缝深约 2.0~3.0 m, 端部有向上游延伸趋势; 大坝上游坝坡出现 3 条纵向裂缝, 缝长 30~50 m 不等, 缝宽 2~10 cm, 探缝深约 0.5 m 左右, 局部段有滑动迹象; 大坝坝顶下游坡边缘处局部有坍塌现象。(2) 溢洪道震损情况: 基本没有震损问题。(3) 放水设施震损情况: 位于大坝左侧的浆砌石梯级卧管放水设施震损渗漏。

由于缺乏地质资料, 无法进行抗滑稳定、抗震稳定和渗流稳定计算。根据大坝形状、土质及“5·12”震损情况, 并与本次勘探的临近备战水库大坝抗滑、抗震计算结果类比判断, 认为所选水库均可以满足相关要求。参照同一时期已勘测的临近水库土质资料进行稳定计算, 得到的结果均满足相关要求。

### 2.1 小型土石坝震损级别及指标范围确定

震损水库一般分为 4 个不同震损级别: 一般险情、次高危险情、高危险情、溃坝险情<sup>[19]</sup>。影响水库震损级别的指标主要有泄水设施损坏、裂缝、渗漏、滑坡、坝顶沉陷及坝体变形 5 项指标<sup>[17]</sup>, 为了根据震损情况对评价指标进行评判打分, 需要将震损指标进行定量化分析, 将震损水库分为 4 个级别, 各级别评判

得分范围相应为:  $[0, 1)$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, 3)$ 、 $[3, 4)$ , 见表 2。

### 2.2 基于改进灰色聚类的震损水库分析评价

从上述材料综合可知, 待评价水库的灰类为 4 类, 取值区间分别为:  $[0, 1)$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, 3)$ 、 $[3, 4)$ 。

工作组根据水库实际震损情况、评价指标和评分标准, 对水库局部震损程度进行评价, 得到水库局部震损程度的评分表, 见表 3。

对第 1 个灰类, 采用半降白化权函数, 取指标的允许下限值为第 1 个灰类的中心值; 对第 4 个灰类, 采用半升白化权函数, 取指标的允许上限值作为第 4 个灰类的中心值; 第 2, 3 两个灰类, 中心值分别取第 2, 3 级指标允许范围的中心值。即  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 1.5$ ,  $\lambda_3 = 2.5$ ,  $\lambda_4 = 4$ 。

表 2 水库震损程度评价指标评分值范围确定标准<sup>[18]</sup>

Tab. 2 Scoring standards for the evaluation indexes of reservoir damage level

指标	一般险情[0, 1)	次高危险情[1, 2)	高危险情[2, 3)	溃坝险情[3, 4)
裂缝	无裂缝	坝体有不连续纵向裂缝, 连续长度小于 20 m; 裂缝最大宽度小于 1 cm; 有少量不连续横缝	坝体存在整条纵向裂缝, 裂缝长度小于 20 m, 裂缝最大宽度小于 10 cm; 存在整条横向裂缝, 裂缝不贯通, 且最大宽度小于 1 cm	存在整条纵向裂缝, 裂缝长度大于 20 m; 裂缝最大宽度大于 10 cm; 存在整条横向裂缝, 裂缝贯通, 且最大宽度大于 1 cm
滑坡	无滑坡	范围小于坝坡的 1%; 不影响大坝正常运行	范围小于坝坡的 10%; 影响运行, 但不影响大坝安全	范围超过坝坡的 10%; 影响大坝安全
渗漏	很少	一般	较严重	严重
坝顶沉陷及坝体变形	很少	一般	较严重	严重
泄水设施	无或轻微损坏	只存在局部损坏	局部损坏并影响运行	不能正常运行

表 3 库局部震损程度评分

Tab. 3 Partial damage level scores of the reservoirs

水库名称	裂缝	滑坡	渗漏	坝顶沉陷及坝体变形	泄水设施损坏
新埝河	3.25	2.25	1	2	1.75
石音观	2.25	0.75	1.5	0.5	1.25
罗家槽	1.25	0.5	1	0.25	2.5
左家庙	3.5	2.75	2.5	1.5	0.75
群力	2.25	1.25	1.25	0.5	0.5
备战	3.5	1.75	3.25	2	1.25

以新埝河水库为例, 由公式(1)至公式~(4)得到归一化后的新埝河水库的白化权函数为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.333 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.667 & 0.5 & 0.75 \\ 0.5 & 0.75 & 0 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

运用二元对比的方法确定各指标的权重<sup>[19]</sup>, 结合专家意见, 得到影响土石坝震损级别的各指标权重分别为:  $\omega = [0.600, 1, 0.667, 0.729, 0.429]$ , 归一化后得到:  $\omega = [0.175, 0.292, 0.195, 0.213, 0.125]$ 。

根据公式(5)计算新埝河水库对于 4 个灰类的综合聚类系数。

$$c^* = [0.065, 0.403, 0.444, 0.088]$$

将新埝河水库的数据带入计算公式(6), 选取  $\eta = (1, 2, 3, 4)^T [20]$ , 计算得到新埝河水库的综合价值测度为 2.554。同理可得其他待评价水库的综合价值测度, 计算成果见表 4。

表 4 待评价水库综合价值测度

Tab. 4 Comprehensive value measure of the reservoirs

编号	1	2	3	4	5	6
水库名称	新埝河	石音观	罗家槽	左家庙	群力	备战
综合价值测度	2.555	1.822	1.659	2.770	1.830	2.774

已知灰类取值区间为  $[0, 1)$ ,  $[1, 2)$ ,  $[2, 3)$ ,  $[3, 4)$ 。根据公式(7)、(8)计算各指标对于第  $k$  个灰类的综合相对长度,  $d^1 = d^2 = d^3 = d^4 = 0.173$ 。归一化得  $d^1 = d^2 = d^3 = d^4 = 0.25$ 。按照步骤 5 中等级判断标准得:  $v_i < 1.5$  为 I 级,  $1.5 \leq v_i < 2.5$  为 II 级,  $2.5 \leq v_i < 3.5$  为 III 级,  $v_i \geq 3.5$  为 IV 级。

对表 4 中 6 个待评价水库的综合价值测度进行分析, 得到相应的除险加固顺序和评价等级, 见表 5。

表 5 聚类与排序并重的改进灰色聚类模型的分析评价结果

Tab. 5 Evaluation results based on improved grey clustering with equal stress on clustering and ordering

编号	1	2	3	4	5	6
水库名	新埝河	石音观	罗家槽	左家庙	群力	备战
综合价值测度	2.555	1.822	1.659	2.770	1.830	2.774
加固顺序	3	5	6	2	4	1
评价等级	III	II	II	III	II	III

对表 5 中计算结果进行分析, 得到的最终加固排序为: 备战, 左家庙, 新埝河, 群力, 石音观, 罗家槽。其中, 备战、左家庙、新埝河三个水库为 III 级, 即高危险情水库, 群力、石音观、罗家槽三个水库为 II 级, 即次高危险情水库, 所得险情等级与现场专家及工作人员得到的等级评价一致。

### 2.3 结果对比分析

对 6 个待评价水库, 同时采用可变集的分析评价方法进行计算, 得出的结果见表 6。

对表 5、表 6 中的数据进行综合对比分析, 对比结果见表 7。

由表 7 易知两种评价方法的结果不论是在除险加固排序方面, 还是在等级评价方面得到的结果均是一致的, 且得到的评价等级与现场专家组和工作人员所得结论完全一致。实际中, 备战水库坝体震损情况严重, 坝体最长裂缝长度达到 130~140 m,

宽度和深度分别达到 30 cm 和 3.0 m,且有向上游延伸的趋势,除此之外,放水卧管底板及边墙发生多处断裂,渗漏呈射流状,经测量其渗漏量达到了 2.5 L/s,相对于其余各个水库,备战水库震损情况最为严重,加固工作刻不容缓;罗家槽水库除放水设施局部损坏影响到运行之外,大坝无明显震损,溢洪道本身也无明显损坏,经专家组评定,其震损情况是几个

待评价水库中最轻的。运用聚类与排序并重的改进灰色聚类决策方法计算结果与现场专家组根据大坝实际情况评定的结论基本一致,且与相关方法计算结果对比结果误差甚微,由此说明基于改进灰色聚类的震损水库分析评价方法计算结果反应了水库震损的真实程度,在震损水库等级评价和除险加固顺序研究领域具有较高的可靠性。

表 6 于可变集的震损水库分析评价结果

Tab. 6 Evaluation results of the earthquake damaged reservoirs based on variable set

水库	基于可变集的震损水库分析评价结果					稳定范围	均值	排序	等级
	$\alpha=1, p=1$	$\alpha=1, p=2$	$\alpha=2, p=1$	$\alpha=2, p=2$					
新埧河	2.554	2.560	2.550	2.603	0.550~2.603	2.567	3	III	
石音观	1.818	1.881	1.653	1.639	1.639~1.881	1.748	5	II	
罗家槽	1.664	1.786	1.347	1.403	1.347~1.786	1.550	6	II	
左家庙	2.784	2.740	2.942	2.901	2.740~2.942	2.842	2	III	
群力	1.827	1.919	1.696	1.754	1.696~1.920	1.799	4	II	
备战	2.940	2.832	3.148	3.024	2.832~3.148	2.986	1	III	

表 7 两种方法结果对比

Tab. 7 The results of the two methods

水库	改进的灰色聚类		可变集	
	加固顺序	等级	加固顺序	等级
新埧河	3	III	3	III
石音观	5	II	5	II
罗家槽	6	II	6	II
左家庙	2	III	2	III
群力	4	II	4	II
备战	1	III	1	III

### 3 结论

基于改进灰色聚类的震损水库分析评价方法,在聚类与排序并重的灰色聚类决策理论基础上,科学的选取水库的震损指标,同时考虑震损水库聚类和排序两方面的特点,克服了灰色聚类在白化权函数选择及聚类原则方面的主观性,计算简单,可操作性强,得到的结果更为科学、严谨。实例应用并与相关技术方法对比结果表明,聚类与排序并重的改进的灰色聚类决策方法应用于震损水库等级评价及除险加固排序领域是合理的。该方法的不足之处在于评分时所具有的主观因素,然而在大规模的震损水库除险加固工作中,有利于快速确定除险加固顺序和震损级别,及时对重大病险水库采取加固措施,在很大程度上减小了工作量,提高了工作效率,对抗震救灾工作有很大的推广意义。

### 参考文献(References):

- [1] DENG Ju-long. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.
- [2] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. (DENG Ju-long. The primary methods of grey system theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987. (in Chinese))
- [3] DENG Ju-long. Introduction to grey systems[J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24.
- [4] 吴业楠, 钟平安, 赵云发, 等. 基于灰色关联分析的相似洪水动态展延方法[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 126-130. (WU Yeanan, ZHONG Pingan, ZHAO Yunfa, et al. Dynamic extending approach of similar flood based on gray correlation analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 126-130. (in Chinese))
- [5] 任凤, 安吉斯, 张吉春, 等. 加权多变量灰色模型在变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2012(5): 146-148. (REN Feng, AN Ji si, ZHANG Ji chun, et al. The applications of weighted multivariable gray model in deformation monitoring[J]. Geospatial Information, 2012(5): 146-148. (in Chinese))
- [6] 许峰, 秦成. 地下水环境质量评价—基于粗糙集理论和灰色关联系数矩阵的TOPSIS模型. 南水北调与水利科技. 2015, 13(6): 1097-1109. (XU Feng, QIN Cheng. Evaluation of groundwater environment quality based on rough set and TOPSIS model of gray correlation coefficient matrix[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1097-1109. (in Chinese))
- [7] 徐镇凯, 黄海鹏, 魏博文, 等. 基于系统多层次灰色模型的洪灾风险综合评价方法—以鄱阳湖流域为例[J]. 南水北调与水利科技. 2015, 13(1): 20-23. (XU Zhen kai, HUANG Hai peng, WEI Bowen, et al. Comprehensive evaluation method of flood

- risk based on multi level gray system model—a case study in Poyang lake basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13 (1): 20-23. (in Chinese)
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用(第5版) [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [9] 苏为华, 余明江. 对灰色系统综合评价方法中两个问题的认识 [J]. 统计研究, 2002 (10): 49-52. (SU Weihua, YU Mingjiang. Two problems in the comprehensive evaluation method of grey system [J]. Statistical Research, 2002 (10): 49-52. (in Chinese))
- [10] 董奋义, 刘俊娟, 刘斌, 等. 灰色综合聚类法的改进及其在河南省农村经济发展水平评价中的应用 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 479-483. (DONG Feiyi, LIU Junjuan, LIU Bin, et al. Improved grey integrated clustering method and its application in the evaluation to rural economic development of Henan province [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(4): 479-483. (in Chinese))
- [11] 强凤娇, 王化中. 基于聚类与排序并重的灰色聚类决策方法改进 [J]. 统计与决策, 2015, 15: 35-39. (QIANG Fengjiao, WANG Huarzhong. Improved grey clustering decision method based on clustering and ordering equal attention [J]. Statistics and Decision, 2015, 15: 35-39. (in Chinese))
- [12] 王丽学, 孙菲菲, 陶硕, 等. 基于层次分析法的震损水库险情综合评价指标体系及应用 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 62-64. (WANG Lixue, SUN Feifei, TAO Shuo, et al. Comprehensive evaluation index system of earthquake damaged reservoir danger based on AHP [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3): 62-64. (in Chinese))
- [13] 田林钢, 靳聪聪. 基于改进的熵权TOPSIS法的震损水库最佳除险加固方案选择 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 68-71. (TIAN Lirgang, JIN Congcong. Optimization selection of earthquake damaged reservoir reinforcement planning based on improved entropy Weight TOPSIS [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 68-71. (in Chinese))
- [14] 唐远东, 张光科, 刘超. 震损水库大坝应急除险方案设计探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2009, (10): 127-129. (TANG Yuanrong, ZHANG Guangke, LIU Chao. A discussion on emergency plans for a dam damaged by the earthquake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009, (10): 127-129. (in Chinese))
- [15] 杨宝全, 张林, 王华, 等. 汶川地震震损水库典型土石坝除险加固分析 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 146-150. (YANG Baquan, ZHANG Lin, WANG Hua, et al. Analysis on consolidation of a typical earth rock fill dams which damaged in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 146-150. (in Chinese))
- [16] 梁军. 四川省大中型水库震后修复治理对策 [J]. 四川水利, 2009(3): 2-6. (LIANG Jun. Post earthquake repair and treatment strategies for large and medium sized reservoirs in Sichuan province [J]. Sichuan Water Conservancy, 2009 (3): 2-6. (in Chinese))
- [17] 黄云超, 巴超, 冶小文. 基于层次分析法的震损水库险情级别分类探讨 [D]. 水利水电工程, 2014, 4(31). (HUANG Yunchao, BA Chao, YE Xiaowen. Danger level classification of earthquake damaged reservoir based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) [J]. Construction, 2014, 4(31). (in Chinese))
- [18] 倪小荣, 王士军, 谷艳昌. 基于关键指标的水库大坝震损程度综合评价体系 [J]. 水利水运工程学报, 2010, (4): 27-32. (NI Xiaorong, WANG Shijun, GU Yanchang. Comprehensive evaluation of earthquake damage degree of reservoir dam based on key indexes [J]. Hydroscience and Engineering, 2010, (4): 27-32. (in Chinese))
- [19] 陈守煜, 郭瑜. 模糊可变集合及其在防洪工程体系综合风险评估中的应用 [J]. 水利水电科学进展, 2005, 25(6): 4-8. (CHEN Shouyu, GUO Yu. Variable fuzzy sets and their application to comprehensive risk evaluation for flood control engineering system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 4-8. (in Chinese))
- [20] 党耀国, 刘思峰, 翟振杰等. 灰色综合聚类评估模型的研究 [J]. 统计与决策, 2004, (10): 4-5. (DANG Yaoguo, LIU Sifeng, ZHAI Zhenjie, et al. Study of comprehensive grey clustering evaluation model [J]. Statistics and Decision, 2004, (10): 4-5 (in Chinese))