

病险水库除险加固效果的量化评价模型

沈振中^{1,2}, 甘磊², 徐力群², 张湛^{2,3}

(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. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河南省水利厅, 河南 郑州 450003)

摘要: 由于我国病险水库除险加固工程浩大, 但除险加固效果综合评价的理论和方法较少, 导致大量除险加固工程实际加固效果难以准确评估。为此, 研究病险水库除险加固效果评价的定量分析方法, 定义除险加固方案、功能指标康复程度、工程施工与除险加固效益等 4 个除险加固效果影响因素集, 提出水库大坝除险加固效果影响因素的“积木模型”。提出水库除险加固效果评价指标量化方法, 包括评价指标等级划分, 时效与非时效评价指标量化方法, 专家主观、客观权重确定以及指标静态、动态权重确定等, 建立了水库大坝除险加固效果量化评价模型。将该模型运用于某病险水库除险加固效果评价中, 模型评价结果与实际情况及验收结论吻合。

关键词: 病险水库; 除险加固; 积木模型; 量化评价; 时效性指标; 动态权重

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2018)05-0010-05

Quantitative evaluation model of reinforcement effect for dangerous reservoirs// SHEN Zhenzhong^{1,2}, GAN Lei², XU Liqun², ZHANG Zhan^{2,3} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Water Resources Department of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Reinforcement of dangerous reservoirs is a huge project in China, but the theories and methods of comprehensive assessment for the reinforcement effects are limited, leading to the difficulty to accurately evaluate the actual effects for a large number of reinforcement projects. The quantitative analysis of the evaluation method of the reinforcement effect for dangerous reservoirs is studied. Four reinforcement impact factors are defined, including the evaluation of reinforcing schemes, functional index rehabilitation, engineering construction and the benefit of reinforcement, based on which a “Building Block Model” of the influence factors is established to evaluate reservoir reinforcement effect. Quantification methods for the reinforcement effect evaluation indexes are proposed, including the evaluation indicator grading, time-dependent and time-independent evaluation indexes, subjective and objective weight of experts, static and dynamic weight. The quantitative evaluation model for evaluating the reinforcement effect of dangerous reservoirs is obtained. The model is applied to the reinforcement assessment of a dangerous reservoir and the results agree well with the actual situation and the acceptance conclusion.

Key words: dangerous reservoir; reinforcement; Building Block Model; quantitative evaluation; time-dependent index; dynamic weight

自“75·8”洪水以来,我国分批次开展了大规模的病险水库除险加固工作,截至 2010 年底,全国大中型和重点小型病险水库除险加固项目已通过竣工验收或主体工程投入使用的有 6 235 座,有效降低了水库的病险率,保障了水库下游人民群众的生命财产安全,提升了水资源调控及抗御灾害的能力^[1-2]。但是,由于缺少加固效果的量化评价方法和

模型,无法准确评价水库的除险加固效果,同时,也有一些水库在除险加固完成后或在加固过程中发生溃坝事故,如 2013 年的新疆联丰、黑龙江星火、山西曲亭等水库的溃坝事故。这反映病险水库除险加固中还存在不可忽视的技术缺陷,有必要通过除险加固效果评价来分析总结经验教训,指导今后的病险水库除险加固工作,杜绝类似事件发生^[3-4]。

基金项目:国家自然科学基金(U1765205);国家自然科学基金青年基金(51609073);江苏高校优势学科建设工程资助项目(Y511001)

作者简介:沈振中(1968—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全分析与评价研究。E-mail:zhzshen@hhu.edu.cn

通信作者:甘磊(1987—),男,副教授,博士,主要从事水工结构安全分析与评价研究。E-mail:ganlei2015@hhu.edu.cn

水库除险加固效果评价是一个复杂的综合性工程^[5-7],除工程技术安全方面的评价之外,还应包括工程经济评价、社会评价和可持续性评价等多方面内容。目前,国内外对病险水库除险加固效果评价的研究涉及甚少,已有研究工作主要偏重于加固技术措施和加固方法两方面,而并未建立规范完整的评价指标体系。病险水库除险加固效果评价是结合预定治理目标,综合比较除险加固前后水库功能指标健康程度及其对应治理效应前后变化的过程^[8-10]。综合评价主要步骤如下:首先,建立一套能够反映治理效果多方面影响因素的评价指标体系;然后,确定能够准确量化评价指标体系中的各定性指标及定量指标的方法,以及各指标对应的治理效果重要程度,并据重要性进行赋值;最后,定量计算除险加固效果评价的综合评价值,确定治理效果。笔者以此为思路,尝试提出病险水库除险加固效果的量化评价模型和方法。

1 水库除险加固效果影响因素

水库除险加固效果涉及水库本身的功能,以及除险加固方案、施工、效益等多个因素;从时间跨度上,除险加固效果涉及除险加固工程实施前后大坝功能的对比,即大坝的功能康复程度;除此以外,除险加固中的人为因素,也会对加固质量造成影响,也是需要考虑的因素。因此,将水库除险加固效果影响因素综合划分为除险加固方案、功能指标康复程度、工程施工与除险加固效益等4个方面,各方面因素相互之间的结构关系可采用“积木模型”表征,如图1所示。①除险加固方案,包括方案的工程投资、工程技术、工程施工3个影响因素。其中工程投资影响因素包括投资利用的合理性、充分性;工程技术影响因素包括加固技术的适用性、安全性、可靠性;工程施工包括施工设备、施工工艺、施工工期等。②功能康复程度,它是除险加固效果评价中最关键、对评价结果影响最大的因素,可分为防洪、渗流、结构等7个分项,而每个分项所包含的具体内容依据不同坝型侧重点有所不同。③工程施工安全,保障除险加固施工安全是基本要求,需从人员素质、安全管理、施工环境、施工现场安全管理、安全保障等方面入手。④除险加固效益,主要包括经济效益、生态效益和社会效益。

面入手。④除险加固效益,主要包括经济效益、生态效益和社会效益。

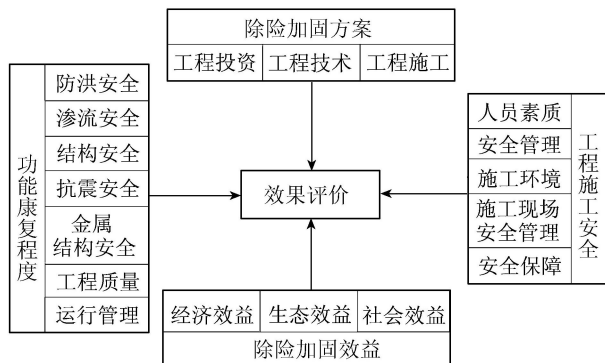


图1 水库除险加固效果影响因素的“积木模型”

2 量化评价模型

系统研究水库除险加固效果的定量评价方法,构建量化评价模型,其关键技术包括评价指标等级划分、指标量化、专家权重确定、指标权重确定等。

2.1 评价指标等级划分

根据加固后水库运行状态,将评价指标等级分为5级,各评价等级的判别标准如表1所示。

2.2 指标量化

2.2.1 非时效指标

对于非时效定性指标及量纲相差较大的可量化时效指标(如安全监测效应量)直接由专家根据工程经验,依照定性指标评分表打分量化。对于非时效定量指标,如防洪效益、灌溉效益等,计算加固前(后)具体值,以水库除险加固前的指标值为基准,推算除险加固后该指标值的提升倍数,从而进行量化评价。

2.2.2 时效指标

对于时效指标,需要对除险加固前后的指标状态分别评价,比较指标的提高程度,从而确定指标的评价值。

a. 时效指标安全度评分。对于效益型指标^[11],采用下式计算:

$$x = \begin{cases} \frac{t}{at + b} & t < 2.54 \\ 100 & t \geq 2.54 \end{cases} \quad (1)$$

对于成本型指标^[11],采用下式计算:

表1 各评价等级判别标准

评价等级	指标评价值	判别标准
完全成功	[90,100]	各种评价指标的评价值超过预期目标,加固后水库相应功能、效益超过设计水平,且较加固前得到很大改善
较成功	[80,90)	各种评价指标的评价值达到预期目标,加固后水库相应功能、效益基本达到设计水平,且较加固前得到较大改善
基本成功	[70,80)	各种评价指标的评价值达到预期目标,加固后水库相应功能、效益基本达到设计水平,但较加固前改善程度有限
不成功	[60,70)	部分评价指标的评价值未达到预期目标,加固后水库相应功能、效益接近设计水平
失败	[0,60)	各种评价指标的评价值根本未达到预期目标,除险加固后水库仍处于需要除险加固的状态

$$x = \begin{cases} 1/t & t < 2.54 \\ a/t + b & \\ 100 & t \geq 2.54 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为指标安全度评分; t 为指标安全参数与该指标对应规范规定值的比值; a, b 为该双曲线函数的参数,可取 $a = 1/165, b = 1/100$,也可根据工程或评价指标的实际情况适当调整。当除险加固后指标值达到2.54,表明除险加固是成功的。

b. 指标安全度模型。根据分析,大坝安全性态的演化过程具有S形曲线的特征,采用Logistic曲线^[11](图2),其表达式为

$$S = \frac{1.0087}{1 + e^{-0.0784(x-50.2843)}} \quad x \in [0, 100] \quad (3)$$

式中: x 为评价指标安全度评分; S 为评价指标安全度, S 值越接近于1,安全程度越高。

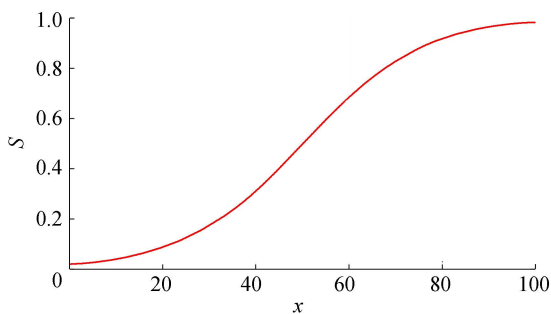


图2 评价指标安全度模型曲线

c. 安全等级提升模型。定义安全等级提升系数为

$$C = \frac{S_2 - S_1}{S_{\max} - S_{\min}} \quad S_1, S_2 \in [0, 1] \text{ 且 } S_2 \geq S_1 \quad (4)$$

式中: C 为指标安全等级提升系数; S_1 为除险加固前指标安全度; S_2 为除险加固后指标安全度; S_{\max} 为安全度最大值,取值0.9886; S_{\min} 为安全度最小值,取值0.0192。

d. 指标评价。根据指标评价等级判别准则,时效指标评价值的计算公式应具有如下性质: C 越大或者 S_2 越大,其评价值越高;时效指标中 S_1 与 S_2 越接近,其评价值越低,且 S_1 与 S_2 接近程度相同时, S_2 越小评分越低。基于此,确定时效指标评价值的计算公式如下:

$$X = [(X_{\max} - X_{\min})C + X_{\min}] S_2^{\frac{mS_1}{n-C}} \quad S_2 \geq 0.6877 \quad (5)$$

式中: X_{\max}, X_{\min} 分别为 S_2 所在区间范围的最大、最小评价值; m, n 为待求常数,若假定 $S_1 = 0.3114, S_2 = 0.6887$ 时, $X = 70; S_1 = 0.0192, S_2 = 0.9886$ 时, $X = 100$,则 $m = 0.7505, n = 1.50$ 。

2.3 专家权重确定

计算专家权重,既需考虑专家在水库除险加固领域的权威性,也需考虑专家面对不同专业知识的局限性。因此,首先分析拟邀请专家的背景,构建专家权威性测定矩阵,利用模糊优选理论得到各专家的主观权重^[12-13];然后,针对给定的因素集,利用层次分析法确定各专家的客观权重^[14];最后,通过最小信息熵原理^[15],将专家的主客观权重组合为组合权重。

最小信息熵目标函数为

$$\min F = \sum_{j=1}^m \bar{\omega}_{ij} (\ln \bar{\omega}_{ij} - \ln \omega_{ij}) + \sum_{j=1}^m \bar{\omega}'_{ij} (\ln \bar{\omega}'_{ij} - \ln \omega'_{ij}) \quad (6)$$

式中: $\bar{\omega}_{ij}, \omega_{ij}, \omega'_{ij}$ 分别表示第 i 准则层下第 j 个专家的综合权重、主观权重和客观权重。

用拉格朗日乘子法求解上述优化问题,可得专家组合权重为

$$\bar{\omega}_{ij} = \frac{(\omega_{ij} \omega'_{ij})^{1/2}}{\sum_{j=1}^m (\omega_{ij} \omega'_{ij})^{1/2}} \quad (7)$$

2.4 指标权重确定

a. 静态权重。运用和声搜索层次分析法(HS-AHP)^[16-17],通过专家给出的判断矩阵,得到专家静态权重:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (8)$$

b. 动态权重。基于静态权重,考虑指标评价值 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 对静态权重的影响,建立指标动态权重影响计算公式^[18]:

$$\omega'_i = \frac{\left(\frac{X_i}{70\omega_i}\right)^{-1}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{70\omega_i}\right)^{-1}} \quad (9)$$

式中: ω_i 为第 i 因素层下指标的静态权重值; X_i 为第 i 因素层下指标的评价值。由于指标评价等级集中基本成功与不成功所对应的评价值界限为70,因此,以70为基准计算指标因素集的动态权重。

3 实例分析

长江流域某病险水库洪水标准按50年一遇设计,500年一遇校核,校核水位为142.46m,总库容为8736万 m^3 ,工程规模为中型水库。大坝为均质土坝,坝顶高程为143.60m,最大坝高为24.1m;溢洪道为开敞式宽顶堰,底宽115m,底部高程139.30m。经大坝安全鉴定,原水库存在病险有:水库防洪能力不足,坝坡、坝脚大面积散浸,局部出现集中渗流,坝坡抗滑稳定安全系数不满足规范要求。2006—2008

年通过溢洪道重建、大坝维修加固、输水洞和泄洪洞加固等对水库进行了除险加固。但设计阶段提出的除险加固工程方案并没有全部实施,如主坝灌浆处理、岸坡加固等,使得除险加固后大坝的渗流性态、结构性态等仍有一些指标(如防渗体渗透性、坝坡抗滑稳定安全系数等)不满足规范要求。因此,有必要对该坝开展除险加固效果综合评价,根据工程实际情况,构建4层、共计61个基础指标的除险加固效果评价指标体系,主要指标如图3所示。

参照指标量化方法,邀请5位权威专家对各指标进行量化,并根据上节所述方法确定专家组合权重,通过较低层次的动态权重以及评分值,即可得到高一层次的评分值,再利用以上相同的计算方法即可得到该层次的动态权重,依次向上操作,最终可得到最高层次所属影响因素的动态权重及除险加固效

果评价的综合评价价值,计算结果见表2。

由表2可知,水库大坝除险加固效果综合评价价值为66.20。与除险加固效果综合评价等级集对照可知,加固效果所处等级为“不成功”。该评价结果表明,已采取的水库除险加固措施并不能明显改善该水库的工作性能。进一步分析其原因,可以看出:在第二层指标中,权重最大(静态权重0.7170、动态权重0.7664)的功能指标康复程度 B_2 评价价值较低,只有61.93,是造成除险加固不成功的主要原因;而在 B_2 的下一层指标中,权重较大的渗流安全康复程度 C_5 (55.42)、结构安全康复程度 C_6 (39.92)和工程质量 C_8 (49.61)评价价值较低。再进一步细分发现 C_5 中指标权重较大的出逸点高程 $D_{5,2}$ (33.28)、最大渗透坡降 $D_{5,4}$ (54.34)和 C_6 中指标权重较大的大坝稳定 $D_{6,1}$ (34.90)评价价值较低。

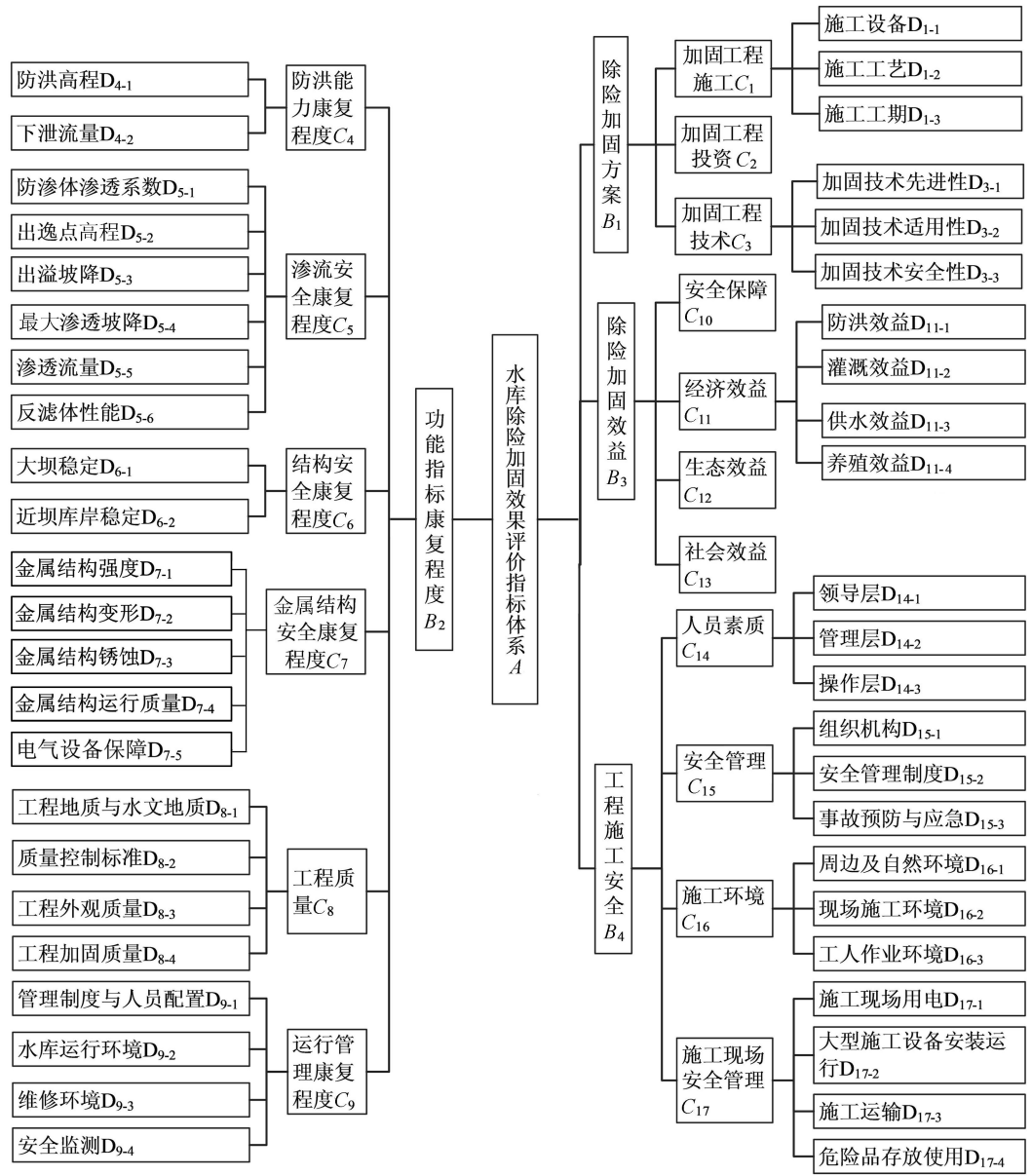


图3 某水库大坝除险加固效果评价指标体系

表2 除险加固各层次指标评价值计算汇总

上层指标集合	所属于指标	静态权重	综合评价值	动态权重	高层次指标评价值
除险加固效果评价指标体系 A	除险加固方案 B_1	0.1054	82.86	0.0842	66.20
	功能指标康复程度 B_2	0.7170	61.93	0.7664	
	除险加固效益 B_3	0.0762	74.38	0.0679	
	工程施工安全 B_4	0.1014	82.30	0.0815	
除险加固方案 B_1	加固工程施工 C_1	0.1148	83.44	0.1140	82.86
	加固工程投资 C_2	0.4426	85.47	0.4246	
	加固工程技术 C_3	0.4426	79.48	0.4614	
功能指标康复程度 B_2	防洪能力康复程度 C_4	0.5009	72.93	0.4254	61.93
	渗流安全康复程度 C_5	0.2343	55.42	0.2618	
	结构安全康复程度 C_6	0.1078	39.92	0.1673	
	金属结构安全康复程度 C_7	0.0806	76.94	0.0649	
	工程质量 C_8	0.0310	49.61	0.0387	
	运行管理康复程度 C_9	0.0399	87.39	0.0376	
	安全保障 C_{10}	0.6195	70.08	0.6575	
	经济效益 C_{11}	0.1258	79.42	0.1178	
	生态效益 C_{12}	0.2547	84.33	0.2246	
除险加固效益 B_3	社会效益 C_{13}	0.6359	87.17	0.6300	74.38
	人员素质 C_{14}	0.2964	82.64	0.2952	
	安全综合管理 C_{15}	0.0822	81.99	0.0825	
工程施工安全 B_4	施工环境 C_{16}	0.1459	83.35	0.1440	82.30
	施工现场安全管理 C_{17}	0.4356	81.35	0.4407	

综合以上分析成果,发现该水库大坝除险加固不成功的主要原因是加固工程参照旧的规范或部分除险加固设计内容未能实施,导致除险加固未能有效改善水库的渗流安全、结构安全状况,从而使得水库大坝除险加固效果综合评价值较低。同时,结合该水库大坝实际运行情况和验收结论,认为该水库除险加固效果综合评价值是合理的。

4 结论

我国病险水库除险加固工程浩大,但除险加固效果综合评价的理论和方法较少,实际加固效果难以准确评估。本文研究了病险水库除险加固效果的量化评价模型和方法,取得的成果如下:

a. 分析了水库除险加固效果的影响因素,建立了水库除险加固效果评价指标体系,构建了反映各影响因素直接关系的“积木模型”。

b. 提出了水库除险加固效果评价指标量化方法,包括评价指标等级划分,时效与非时效评价指标量化方法,专家主观、客观权重确定以及指标静态、动态权重确定等,建立了水库大坝除险加固效果量化评价模型。

c. 针对长江流域某病险水库大坝进行实例分析,采用所建病险水库除险加固效果量化评价模型,计算得出该水库大坝除险加固效果综合评价值为66.20,表明加固效果所处等级为“不成功”,并分析了其主要原因;同时,综合评价该水库大坝实际运行情况和验收结论,验证了评价模型的合理性。

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] 吴中如, 金永强, 郑东健, 等. 水库大坝中溃坝险情的分析研究[R]. 苏州: [出版者不详], 2008.
- [4] 苏怀智, 刘红萍. 高重力坝抗滑稳定安全度分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 20-23. (SU Huaizhi, LIU Hongping. Stability safety degree sliding in high gravity dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 20-23. (in Chinese))
- [5] 顾冲时. 大坝服役非概率可靠性分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 1-9. (GU Chongshi. Non-probabilistic reliability analysis method for dam service [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5): 1-9. (in Chinese))
- [6] 苏怀智. 基于全寿命周期成本理论的水工结构维修加固决策模型和方法[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 38-42. (SU Huaizhi. The decision-making model and method of hydraulic structure maintenance and reinforcement based on the whole life cycle cost theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5): 38-42. (in Chinese))
- [7] 刘冲, 沈振中, 甘磊, 等. 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[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 36-41. (LIU Chong, SHEN Zhenzhong, GAN Lei, et al. Comprehensive evaluation of rehabilitation degree of dangerous reservoirs based on fuzzy gray clustering and combination weighting method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 36-41. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

(下转第80页)