

病险水利工程除险加固效果评价研究进展

王少伟^{1,2}, 苏怀智², 付启民¹

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164;
2. 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)

摘要:除险加固效果评价是目前国内病险水利工程除险加固项目后评价中急需解决的关键问题。针对综合评价所需的指标体系和方法体系,从宏观定性评价、单一效能量化评价、综合评价指标体系、指标权重、评价等级划分及确定等方面,综述了病险水利工程除险加固效果评价的研究进展。认为今后应构建能兼顾病险水利工程除险加固治理效果通用性和特殊性的综合评价指标体系,建立除险加固效果评语集、评价指标权重和等级隶属度三方面的云模型,并强化除险加固效果评价中的可持续发展效应。

关键词:病险水利工程;除险加固效果;评价指标体系;评价方法体系

中图分类号:TV698 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)06-0077-09

Advances in reinforcement effect evaluation for dangerous hydraulic projects//WANG Shaowei^{1,2}, SU Huaizhi², FU Qimin¹ (1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Effect evaluation is a key problem in the post evaluation of reinforcement for dangerous hydraulic projects in China. Aiming at the index system and the methodology for comprehensive evaluation, the state of art in reinforcement effect evaluation for dangerous hydraulic projects are summarized in the aspect of macro qualitative evaluation, single efficiency evaluation, comprehensive evaluation index system, index weight, grade division and determination of comprehensive evaluation, etc. Future studies should be focused on establishing the comprehensive evaluation index system which considers both the general and special reinforcement effects. In addition, cloud models of remark set, evaluation index weight and membership degree should be established. Meanwhile, the sustainable development effect should be strengthened in the reinforcement effect evaluation.

Key words: dangerous hydraulic project; reinforcement effect; evaluation index system; evaluation methodology

我国水库、水闸、堤防等水利工程大多修建于 20 世纪 50~70 年代,随着服役老化期的临近,以及修建时受经济、技术条件限制而产生的遗留问题,大量工程已逐渐成为病险工程,由此导致工程潜在风险不断增大^[1-2]。2009 年 1 月全国水利工作会议明确指出^[3]:“确保 2010 年底完成全国 6 240 座大中型和重点小型病险水库除险加固任务,在此基础上,启动大中型病险水闸除险加固任务,并加快各地小型病险水闸除险加固步伐”。2014 年国家发展改革委印发了《中央政府投资项目后评价管理办法》,明确指出需要从技术水平、目标实现程度、可持续发展能力、财务及经济效益、社会效益、资源利用效率、环境影响等方面对项目实施的实际效果进行评价,以

便总结经验教训、形成良性项目决策机制。截至 2016 年底,全国已完成多项病险水利工程的除险加固任务,但针对各工程实际取得的加固治理效果的系统评价尚未全面展开。

病险水利工程安全鉴定结论是除险加固决策的依据,也是保证加固治理效果最优的基础。对此,针对我国病险水利工程数量多、病险成因复杂的特点,大量学者建立了各种形式的安全综合评价体系。吴中如等^[4]鉴于我国大坝建设和定检过程中偏重工程安全及社会经济效益,而忽视环境效益和生态效益,进而提出了大坝服役状态评估应遵循社会经济效益最大、对环境与生态的负面影响最小或互为和谐共处的总原则,建立了以工程安全、社会经济效益

益、环境和生态为一级指标的大坝服役性态综合评判模型;何金平^[5]以效应量监测资料为基础,根据监测项目布置状况构建了大坝健康状态综合诊断指标体系的基本框架,同时认为指标体系的建立需要考虑普遍性和特殊性两方面;张宇华等^[6]以多座病险水闸的现场调查、安全检测、复核计算和专家意见等资料为基础,从安全状况、运行状况、耐久状况和其他因素四方面建立了病险水闸风险评判指标体系;冯峰等^[7]基于后果逆向扩散法对黄河堤防工程安全影响因子进行识别,建立了以工程因素和非工程因素为准则层,以堤身因素、堤基因素、隐患因素、河道因素和抢险因素为指标层的黄河堤防工程安全评价指标体系;苏怀智等^[8-9]在分析影响因素的基础上,先后建立了海堤安全性、水电站边坡稳定性等方面的综合评价体系,并对综合评价中所用的主客观权重、等级隶属度等进行了研究;谢婕等^[10]从漫堤和溃堤两方面分别挖掘海堤安全影响因素,构建了海堤安全风险评估体系。

上述水利工程采用综合评价体系侧重于工程安全,以便根据此评价结果对其安全进行定级,进而决定是否需除险加固。而除险加固效果评价不同于加固前安全鉴定和加固方案优选评估,是目前国内病险水利工程除险加固项目后评价中急需解决的关键问题。对此,笔者从评价指标体系和评价方法体系两方面,重点阐述病险水利工程除险加固效果评价的研究现状,并对今后的发展提出一些建议。

1 除险加固效果评价指标体系

目前关于病险水利工程的综合评价主要是除险加固前开展的安全等级评价和除险加固方案优选评估,对于除险加固效果的综合评价则处于刚刚起步阶段,当前的除险加固效果评价主要是对除险加固中某一项或几项功能指标的评估。

1.1 除险加固效果宏观定性评价

除险加固效果的定性评价主要是基于自然语言,在对评价对象的运行状态、工程影响等相关信息细致观察和分析的基础上,利用决策者的经验,围绕工程服役安全性、除险加固效益、社会环境影响等方面,直接对其等级水平、好坏程度、演变趋势等给出一个定性结论。

a. 在除险加固后工程服役安全性方面,其定性评价主要是以监测资料分析和现场检查为主,根据荷载与环境因素协同作用下的工程效应量来反馈加固后工程的安全稳定性。赵凌云等^[11]根据1998年湖北省长江堤防34处溃口应急整治后在1999年汛期特大洪水时的险情状况,对加固治理效果进行了

定性分析评价,结果表明此次应急整治达到了预期效果,有效减轻了1999年特大洪水时的堤防险情;邝强兴等^[12]结合棘洪滩水库大坝干砌石护坡内坡采用现浇混凝土板加固后1997—2009年的运行状况,认为在经历冬季低于零下10℃寒冷气温和长期风速为25 m/s的风浪冲击下加固工程没有发生破坏,表明采用现浇混凝土板加固水库干砌石护坡是成功的,且经济效益较好;苏怀智等^[13]基于原位变形监测资料反演坝体和坝基的弹性模量,评价加固治理对提高大坝材料性能的长期效果;蔡蓁^[14]根据北溪水闸测压管水位在闸基防渗加固后的明显下降效应,认为采用抓斗成槽法修建混凝土防渗墙的加固方案是合理的,加固治理效果是明显的。

b. 在除险加固效益及其社会环境影响方面,其定性评价主要是对病险工程加固治理在降低风险、消除安全隐患、增加受益、改善生态环境等方面的促进作用及可能产生的不利影响进行宏观分析,以便权衡利弊和提出改善措施。綦中跃等^[15]针对密云水库1998—2004年间的除险加固工程,从工程效益、经济效益和社会效益三方面对除险加固工程综合效益进行了分析和评价,结果表明此阶段除险加固效果较好;陈凤等^[16]结合江苏省徐州市石灰岩地区5座小型水库库底渗漏问题的治理,认为病险水库除险加固在促进社会主义新农村建设、提升地区防洪保障能力、发展农业灌溉、改善城乡供水和生态环境等方面具有明显的社会效益;杨世华等^[17]针对黄河下游堤防加固工程,基于工程施工前、过程中和结束后的各种监测数据以及工地实时状况,分析了加固工程对环境的有利影响和不利影响,由此表明大中型水利工程施工过程中采取环境保护措施的必要性。

1.2 除险加固单一效能量化评价

病险水利工程除险加固治理单一效能的量化评价主要包括加固治理后单功能指标提升程度评价、经济效益评价、施工质量评价三方面。

a. 加固治理后单功能指标提升程度评价目前主要是针对病险水利工程在防洪标准、渗透稳定性、抗滑稳定性、抗震安全性、地基承载力、消能防冲、建筑结构老化、泥沙淤积等方面的病险问题,基于数值模拟、理论计算、监测反分析等方法来对比加固前后上述功能指标的变化情况,以此评价本次除险加固所取得的工程治理效果。卢晓鹏^[18]通过开挖、钻孔压水试验和室内试验对云南省白鹤水库防渗加固中的高压喷射灌浆加固效果进行了分析,加固后平均渗透系数为 0.68×10^{-6} cm/s,坝脚渗水量由98.6 L/s降至0.35 L/s;张建华等^[19]针对峡江12号闸墩抗滑稳定安全系数不满足规范要求的问题,研究了底板加

厚和布置锚筋桩两种加固措施的提升效果;Chen等^[20]提出利用锚杆加固方案来提升小溪水电站重力坝坝基抗滑稳定性,由刚体极限平衡法和有限元强度折减法得到的1号坝段抗滑稳定系数加固前分别为3.29和2.0,加固后分别为4.34和2.8;杨宝全等^[21]以汶川地震中受损严重的苍溪县红旗水库土石坝为例,通过理论计算对其上游坝坡放缓培厚加固措施进行分析,结果表明此加固治理使坝坡稳定最小安全系数由1.098~1.145提升到1.262~1.698。

b. 除险加固工程经济效益评估最常用的方法是基于加固前后防洪、灌溉、供水等工程效益增量与除险加固费用之间的关系进行国民经济评价,以及采用新技术、新材料等所带来的额外经济效益的评估,以此评价除险加固工程实施的经济合理性。例如,无锡市锡澄运河三级航道整治工程中为节约天然骨料,同时为了解决废弃混凝土的堆放、占地和环境污染等问题,使用C25等级再生骨料混凝土(RAC)约10万m³,直接节省工程造价125万元^[22]。而病险水利工程一旦失事,将导致巨大的经济损失、生命损失及社会环境影响,因此除险加固治理带来的不仅仅是直接工程效益的增加,因加固治理而避免的潜在风险损失同样需要考虑。对此,胡江等^[23]在溃坝风险率和溃坝生命损失估算的基础上,以加固前后溃坝风险区生命质量指数增量与最大社会愿意支付费用之间的关系来定量评价除险加固效应,并以此作为病险水库除险加固资金投入的决策准则;刘曾美等^[24]基于Copula函数和GIS技术,以有无治涝工程情况下减少的洪涝损失为目标,构建了变化环境下治涝效益的分析计算模型,可为治涝工程建设的合理决策提供依据;何晓燕等^[25]在系统收集水库溃坝后果资料的基础上,建立了水库溃坝社会影响及环境影响评价指标体系和量化方法;魏洪涛等^[26]针对巴家嘴水库除险加固的经济效益主要是降低溃坝概率,避免溃坝淹没损失,在有、无除险加固工程情况

下水库溃坝发生概率和一次性损失分析的基础上,以减少的潜在溃坝损失来评价除险加固工程效益,由此得出近期效益较小、后期效益逐年增加的规律。

c. 除险加固工程施工质量评价目前主要是采用与新建工程相同或类似的质量检测和评价方法。然而加固治理不同于新建工程,其影响因素更多、更复杂,且具有很强的随机性和不确定性,因此除了参照常規新建工程施工质量的检测方法外,加固治理后隐患部位的原位监测反馈分析能更好地反映除险加固工程施工质量。齐建堂等^[27]基于防渗墙施工过程中的混凝土拌和质量、糟孔质量和墙体质量等施工质量检测资料,以及除险加固后的测压管水位监测数据,对黄壁庄水库副坝除险加固防渗工程施工质量进行了评价,结果表明其施工质量达到了设计要求;徐光磊等^[28]从前期工作、建设质量和建设资金三方面评价了病险水库除险加固工程质量,调查分析结果表明建设资金不足、勘探工作不足、鉴定工作不到位和施工质量差是影响除险加固效果的主要因素。

1.3 除险加固效果综合评价指标体系

根据工程经验,综合评价是一个多指标、多层次,且包含大量模糊性和不确定性的复杂分析评价问题,其指标体系的构建需要遵循科学性、全面性、可操作性、定性与定量相结合的原则,在制定总体评价目标的基础上,再根据工程实际特征将其拆解成不同的子目标,以及便于量化和描述的基础评价指标。针对病险水利工程除险加固效果的综合评价,目前尚缺乏系统、完善的综合评价指标体系,部分研究者基于不同的评价目的,从治理效果、工程安全性、工程质量、实施绩效、工程效益及影响等方面进行综合评价,具体统计结果如表1所示^[29-35]。吴焕新^[29]从除险加固方案、加固治理功能指标康复程度和除险加固治理影响三方面建立了评价指标体系,并用于石赓峪水库加固治理效果评价,结果表明

表1 病险水利工程除险加固效果综合评价指标体系

类别	评价目的	一级评价指标(权重)	研究者
水库	治理效果	除险加固方案(0.19);功能指标康复程度(0.54);除险加固治理影响(0.27)	吴焕新 ^[29]
	运行性态	运行管理(0.20);大坝性态(0.20);泄水建筑物(0.20);输水建筑物(0.20);金属及机电设备(0.20)	卢欣 ^[30]
	安全评价	工程质量(0.03);运行管理(0.02);防洪标准(0.35);结构安全(0.17);渗流安全(0.27);抗震安全(0.11);金属结构安全(0.05)	张计 ^[31]
	工程效益	经济效益(0.39);社会效益(0.32);环境效益(0.29)	黄显峰等 ^[32]
	工程质量	质量监督经费(0.17);施工企业整编资料(0.24);参建单位质量行为(0.31);工程实体质量(0.28)	游黎 ^[33]
水闸	工程影响	经济影响(0.32);环境影响(0.37);社会影响(0.31)	卢振园 ^[34]
	过程评价	前期工作(0.08);施工准备阶段(0.06);项目实施过程(0.34);竣工阶段(0.19);运行管理、配套及服务(0.33)	马壮等 ^[35]

注:病险水库的挡水建筑物在实际中主要为土石坝。

该水库复合土工膜防渗加固效果非常好;王宁等^[36]结合房山水库除险加固实际情况,在吴焕新所建指标体系的基础上进行了指标取舍,并邀请专家以该工程为背景重新进行评价指标的两两比较;张计^[31]基于大坝安全量化综合评价体系,以加固前后大坝安全综合评价系数的提升程度作为评价指标,通过划分相应的评价集,实现从大坝安全的角度来量化评价除险加固治理效果,基于该评价方法得到张家咀水库安全系数由加固前的 0.274 提升到加固后的 0.924,使水库由极不安全状态转变为非常安全状态;卢欣^[30]提出了从前期工作、施工过程、加固后运行性态和工程效益四方面建立病险水库加固后评价体系的思路,并以江西省玉山县七一水库除险加固后运行性态为例,开展了指标体系建立、指标内涵解释、权重确定等工作,评价结果表明七一水库加固后运行性态处于“很好”的状态,加固效果达到了预期目的;卢振园等^[34]从经济、社会、环境三方面建立了宿迁闸除险加固工程影响的评价指标体系,评价结果表明宿迁闸除险加固明显改善了当地的生产生活环境,加固效果介于成功与完全成功之间的概率为 78%;马壮等^[35]建立了针对病险水利工程加固治理全过程的后评价体系,并将其用于南四湖二级坝第二节闸,评价结果表明该加固治理工程的过程效果属于 2 级—成功;黄显峰等^[32]从经济、社会、环境三方面建立了病险水库除险加固效益评价指标体系,并将其用于宜昌市小溪塔黑湾水库除险加固工程,结果表明大部分效益指标值达到了预期效益值,但水土流失指标效益较差,后期应加强水土保持措施的力度。

上述工程实践表明,影响病险水闸、大坝等水利工程除险加固效果的关键因素是安全鉴定结论的准确性、加固设计方案对恢复其设计功能的可行性和经济性、施工质量等。对此,王少伟等^[37]依据《中央政府投资项目后评价管理办法》,并结合病险水闸除险加固工程的特点,建立了由安全鉴定结论准确性、除险加固设计方案、服役性能提升程度、除险加固经济效益和除险加固可持续发展效应 5 个一级评价指标和 21 个二级评价指标组成的病险水闸除险加固效果评价指标体系。病险水利工程除险加固的程序、目的、效益等具有一定的相似性,尤其是水库大坝与水闸,因此其他病险水利工程的除险加固效果评价可参照此指标体系,再结合实际需要进行指标的删减,并修正指标权重。

2 除险加固效果评价方法体系

鉴于综合评价指标体系是由多个层次的子指标

组成,且同层子指标对其上层指标具有不同的贡献度,因此综合评价中的方法体系主要包括加固治理效果评价等级的划分、各评价指标属性的量化、评价指标融合权重的确定等,以便将细化的多个基础层指标评价属性融合生成一个简单明确的加固治理效果综合评价值或评价等级。

2.1 除险加固治理效果评价等级的划分

评价等级划分是综合评价的前提,以便根据评价指标在不同等级下的赋值标准来量化评价指标值对应的等级属性。目前水利工程中使用的评价等级主要是三级制至五级制。其中,三级制主要源于规范标准,例如坝工领域所依据的《水库大坝安全鉴定办法》中一类坝、二类坝和三类坝 3 种安全状况,或《水电站大坝运行安全监督管理规定》中正常坝、病坝和险坝 3 种安全等级。鉴于三级制略显粗糙,五级制目前应用较多,同时部分评价者采用四级制,对应的描述语言可归纳为:四级制“优、良、中、差”,五级制“很好、较好、一般、较差和很差”或“完全成功、较成功、基本成功、不成功、失败”等^[29-32,34-35]。

2.2 评价指标融合权重的确定方法

权重的作用在于区分指标之间的相对重要程度,以便据此将多个下层指标值融合成单一的上层指标值,权重确定的合理与否,直接关系到综合评价结果的可信程度。目前常用的指标融合权重主要是基于主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法等确定的点值权重。

a. 主观赋权法。该方法是一种定性方法,利用决策者的知识和经验来给出各指标的权重,主要包括德尔菲(Delphi)法、相对比较法、层次分析(AHP)法等,其中 AHP 法通过构造基于两两因素比较的判断矩阵而实现对定性问题的定量分析,因而简单实用^[38]。盛金保等^[39]基于溃坝后果综合评价对河南省安阳市 10 座小型病险水库进行风险排序时,采用 AHP 法确定的溃坝生命损失、经济损失、社会与环境影响的权重系数分别为 0.737、0.105 和 0.158。然而,主观赋权法受人为主观因素的干扰较大,因此为了降低主观随意性,需要对多位专家赋权结果进行信息融合,目前常用方法为对专家赋予相同或不同的权威性系数后,再进行指标权重的加权平均处理。其中,根据专家赋权结果与专家组整体赋权结果的偏差程度来计算其权威性系数的方法较为客观公正。孙德忠等^[40]将专家组主观权重矩阵的相关系数作为对专家权威系数的赋权,通过相关系数矩阵与指标权重矩阵的乘积计算加权权重矩阵,并循环处理至最终收敛后,再对其归一化处理即可得到融合整个专家组意见的主观权重。

b. 客观赋权法。该方法是一种基于指标数据信息的定量方法,主要有变异系数法、熵权法、主成分分析法、投影寻踪(PP)法、粗糙集理论法等。Lei等^[41]在建立高混凝土坝空间变形熵预警指标时,基于监测所得各测点位移时间序列,采用PP法拟定了各测点变形熵融合时的权重,且测点权重值随季度变化;Gu等^[42]在进行碾压混凝土坝渗流性态综合评价时,基于熵权所反映的指标信息有序度差异性,拟定了多测点预测残差和时效分量的权重。综合而言,客观赋权法可以有效地反映评价指标的数据信息和差异性,但完全忽略了主观信息,仅以指标数据为基础,有时会导致数理推断得到的权重系数明显不合理。

c. 组合赋权法。该方法是将主观赋权法得到的主观权重和客观赋权法得到的客观权重相组合,因而既充分利用了决策者知识、经验的主观性,又兼顾了指标信息所包含的客观性。最常用且简单有效的方法就是将主观权重和客观权重直接进行线性组合,但其准确性依赖于采用的组合系数,其中平均线性组合法采用较多,即主、客观权重各采用0.5的组合系数。周红梅^[43]在评价卧龙山水库重力坝安全性、朱蓓等^[44]在评价三板溪水电站堆石坝面板健康状况、杨海平^[45]在评价某土石坝安全性时,分别采用AHP-PP、AHP-BP神经网络、AHP-熵权的组合方案,主、客观权重各采用0.5的组合系数。除此之外,通过对主、客观权重之间的差异程度进行优化,也是常用的主客观组合权重确定方法,如组合最小二乘法、最小信息熵原理法、距离函数法和最小偏差法等。Zhang等^[46]在进行乌东德水电站库区泥石流流风险评价时,基于最小偏差法计算得到的AHP法和熵权法各自组合系数分别为0.47和0.53,接近主、客观平均线性组合方案。

在指标权重表示方法方面,目前主要采用的是以点值表示的确定性权重。然而,综合评价过程中,评价数据采集的非全面性、原始数据信息的不确定性、评价数据量化的非精确性等,导致在很多情况下无法较好地以点值来准确描述评价对象;同时,作为加固治理效果评语集的“很好、较好、一般、较差和很差”等评价等级,也不是一个“点”的概念,而是一个范围。对此,部分学者认为以非点值形式表示的评价结论有利于更好地体现评价结果的相对合理性,这其中就包含非点值权重,如陈旭东^[47]在评价碾压混凝土工作性态时使用了区间权重;张秋文等^[48]在评价水库诱发地震风险时使用了云模型权重等。与传统点值权重相比,非点值权重不仅对指标相对重要性进行了比较,也对评价语言的模糊性

和离散性有了更加客观的描述,因而更符合人类语言习惯。对此,王少伟等^[49]基于所建包含5个一级评价指标和21个二级评价指标的病险水闸除险加固效果综合评价指标体系,通过对41份专家权重打分调查问卷的统计分析,拟定了评价指标融合的点值权重、区间权重和云模型权重,结果表明经济效益和可持续发展效应2个一级指标的权重取值范围较大,但离散性较小,而7种服役性能提升程度二级评价指标的权重取值范围较小,建议优先采用确定性权重以减少计算量。

2.3 综合评价等级的确定方法

综合评价等级的确定需要以基础层评价指标信息为基础。根据工程经验,评价指标按其能否用精确数值描述分为两类:定性评价指标和定量评价指标。前者具有一定的模糊性和不确定性,主要基于专家经验或工程类比来对其进行评判性描述;后者可以根据理论计算得出,如除险加固效果功能指标提升程度中的抗滑稳定性,直接通过抗滑力与滑动力的比值得到加固前后的抗滑稳定安全系数。目前常用的综合评价等级确定方法可归纳为两类,分别是基于加权综合评分值和最大等级隶属度的确定方法。

a. 基于加权综合评分值的评价方法。该方法首先需要标准化基础层评价指标值,然后逐层加权汇总各评价指标值得到综合评价值,最后再根据事先拟定的评价等级及其对应的评价值范围来确定其综合评价等级^[29-31,35-36]。该类方法中,由于各评价指标量纲不统一,且各指标的优化准则不一致,因此其关键在于根据事先拟定的各评价等级对应的评价值取值范围,对基础层评价指标值进行标准化,其中定性评价指标多采用专家打分法,定量评价指标则按效益型、成本型、固定型、区间型、偏离型等不同的指标类型,采用线性函数或非线性函数对其进行标准化处理。

b. 基于最大等级隶属度的评价方法。该方法首先从基础层评价指标开始,分别计算各评价指标对评价等级的单一隶属度,然后加权汇总生成目标层的综合隶属度,并以最大综合隶属度对应的等级作为综合评价等级^[32,34]。与基于加权综合评分值的评价方法不同的是,该方法需要首先确定基础层评价指标的等级隶属度。对于定性评价指标,通常多采用等级比重法;定量评价指标则需要事先对每一个底层评价指标进行等级取值范围的划分,再根据选取的隶属函数计算其等级隶属度。目前常用的该类方法主要是模糊综合评价法、灰色关联度评价法、可拓综合评价法等,但这些方法大多只针对评价过程中的模糊性或随机性,没有同时兼顾两者的影

响。对此,大量学者将能同时考虑模糊性和随机性的云模型理论引入到综合评价中,通过建立评语集云模型和等级隶属度云模型,使得评价等级不再采用明晰的区间划分,更加符合人类语言习惯^[50-51]。

3 研究展望

a. 构建能兼顾病险水利工程除险加固治理效果通用性和特殊性的综合评价指标体系。病险水利工程除险加固涉及面广,各工程的病险问题既有共性部分,又有各自的特殊性。现有的加固治理单一效能评价方法主要为针对工程安全、经济效益等某一方面的评价方法,均无法完全兼顾加固治理效果评价的通用性和特殊性。因此,需要在分析水利工程病险成因和主要加固措施的基础上,深入挖掘病险水利工程除险加固效果的影响因素,构建能同时兼顾加固治理效果通用性和特殊性的病险水利工程除险加固效果综合评价指标体系,以便对同类除险加固工程进行类比评价和反馈指导。

b. 基于云模型进行病险水利工程除险加固效果的综合评价。除险加固效果综合评价中获取的基础层评价指标信息、评价指标权重等均包含大量的不确定性;同时,作为加固治理效果评语集的“很好、较好、一般、较差和很差”等评价等级,也不是一个“点”的概念,而是一个范围。结合当前综合评价领域中使用的云模型理论,研究建立病险水利工程除险加固效果的评语集云模型、评价指标权重云模型和隶属度云模型,进而同时反映评价指标信息、权重和评语集的不确定性,并将不确定信息中的模糊性和随机性有机结合起来,以提高综合评价的系统性和精确性。

c. 强化除险加固效果评价中的可持续发展效应。当前水闸除险加固中涉及大量的混凝土结构拆除重建工程,若将此废弃混凝土块用于制备 RAC,既可解决资源短缺问题,也可解决加固治理引起的部分环境污染问题;此外,部分除险加固工程存在加固后短期内的反复加固问题,因此需要对本次加固治理后工程的预期服役寿命及后期加固治理的经济性和技术可行性等可持续效应进行评价。

参考文献:

[1] 顾冲时,苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 1-12. (in Chinese))

[2] WU Zhongru, PENG Yan, LI Zhanchao, et al. 水利水电科技进展,2018,38(6) Tel:025-83786335

Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 767-780.

[3] 水利部水利建设与管理总站,黄河水利科学研究院. 水闸安全鉴定技术指南[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2009.

[4] WU Zhongru, XU Bo, GU Chongshi, et al. Comprehensive evaluation methods for dam service status [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(8): 2300-2312.

[5] 何金平. 大坝健康状态综合诊断方法研究进展[J]. 水电与新能源,2016(1):1-6. (HE Jinping. Advances in comprehensive diagnostic methods for dam health status [J]. Hydropower and New Energy, 2016(1):1-6. (in Chinese))

[6] 张宇华,靳聪聪,范冰,等. 基于熵权法与模糊综合分析法的病险水闸风险评价[J]. 水力发电,2013,39(12):39-42. (ZHANG Yuhua, JIN Congcong, FAN Bing, et al. Risk assessment of dangerous sluice based on fuzzy comprehensive analysis and entropy weight method [J]. Water Power, 2013, 39(12): 39-42. (in Chinese))

[7] 冯峰,倪广恒,何宏谋. 基于逆向扩散和分层赋权的黄河堤防工程安全评价[J]. 水利学报,2014,45(9):1048-1056. (FENG Feng, NI Guanghen, HE Hongmou. Research on safety evaluation of Yellow River embankment based on consequence-reverse-diffusion and layered-weight method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1048-1056. (in Chinese))

[8] SU Huaizhi, QIN Peng, QIN Zhihai. A method for evaluating sea dike safety [J]. Water Resources Management, 2013, 27(15): 5157-5170.

[9] SU Huaizhi, LI Jinyou, CAO Jiping, et al. Macro-comprehensive evaluation method of high rock slope stability in hydropower projects [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2014, 28(2): 213-224.

[10] 谢健,龚政,陈永平,等. 海堤安全评价指标体系的构建及应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):59-63. (XIE Jie, GONG Zheng, CHEN Yongping, et al. Establishment and application of index system for seawall safety assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2016, 36(2): 59-63. (in Chinese))

[11] 赵凌云,梅金焕. 湖北省长江堤防 1998 年溃口险情整治及其效果后评估[J]. 中国防汛抗旱,2009,19(1):49-53. (ZHAO Lingyun, MEI Jinhuan. Renovation and its effect assessment of Yangtze River embankment breaches in Hubei Province in 1998[J]. China Flood and Drought Management, 2009, 19(1): 49-53. (in Chinese))

[12] 邴强兴,孙安帅,纪君娜,等. 棘洪滩水库大坝除险加

E-mail:jz@hhu.edu.cn http://www.jour.hhu.edu.cn

- 固工程措施探讨[J]. 水利经济, 2011, 29(2): 49-51. (BING Qiangxing, SUN Anshuai, JI Junna, et al. Engineering measures for reinforcement of Jihongtan Reservoir Dam [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 29(2): 49-51. (in Chinese))
- [13] SU Huaizhi, ZHANG Shuai, WEN Zhiping, et al. Prototype monitoring data-based analysis of time-varying material parameters of dams and their foundation with structural reinforcement[J]. Engineering with Computers, 2017, 33(4): 1027-1043.
- [14] 蔡蓁. 北溪水闸枢纽闸基防渗工程除险加固效果分析[J]. 水利科技, 2011, 34(1): 56-58. (CAI Zhen. Analysis on reinforcement effect of seepage control project of Beixi sluice foundation [J]. Hydraulic Science and Technology, 2011, 34(1): 56-58. (in Chinese))
- [15] 綦中跃, 周上梯. 密云水库除险加固综合效益分析与评价[J]. 水利建设与管理, 2009, 29(5): 43-45. (QI Zhongyue, ZHOU Shangti. Comprehensive benefit analysis and evaluation of Miyun reservoir reinforcement [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2009, 29(5): 43-45. (in Chinese))
- [16] 陈凤, 张华, 吴玉柏. 石灰岩地区小水库除险加固工程的经济社会效益分析[J]. 水利经济, 2011, 29(1): 19-21. (CHEN Feng, ZHANG Hua, WU Yubai. Social and economic benefits of disaster mitigation and reinforcement of small reservoirs in limestone areas [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 29(1): 19-21. (in Chinese))
- [17] 杨世华, 焦莉莉, 王福昌. 黄河下游堤防加固工程中的环境保护[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 515-520. (YANG Shihua, JIAO Lili, WANG Fuchang. Environmental protection of the Lower Yellow River embankments reinforcement projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 515-520. (in Chinese))
- [18] 卢晓鹏. 高压喷射灌浆技术在云南病险水库加固工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 82-85. (LU Xiaopeng. Application of high-pressure sprinkling grouting technology to reinforcement of ill-conditioned reservoirs in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2012, 32(5): 82-85. (in Chinese))
- [19] 张建华, 李海枫, 周秋景, 等. 峡江水利枢纽工程典型泄水闸段抗滑稳定及加固措施研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(11): 33-36. (ZHANG Jianhua, LI Haifeng, ZHOU Qiujing, et al. Study on anti-sliding stability of typical discharge sluice section of Xiajiang Water Control Project and its reinforcement measures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(11): 33-36. (in Chinese))
- [20] CHEN Shenhong, YANG Zhiming, WANG Weiming, et al. Study on rock bolt reinforcement for a gravity dam foundation [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(1): 75-87.
- [21] 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 Baoquan, ZHANG Lin, WANG Hua, et al. Analysis on consolidation of typical earth-rockfill dam which damaged in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 146-150. (in Chinese))
- [22] 刘震宇, 秦鸿根, 刘冠国, 等. 再生混凝土力学性能提升技术与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 90-94. (LIU Zhenyu, QIN Honggen, LIU Guanguo, et al. Technique for improvement of mechanical properties of recycled concrete and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 90-94. (in Chinese))
- [23] 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. (HU Jiang, SU Huaizhi. Quantitative evaluation framework of reinforcement based on the LQI for dangerous dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(7): 852-859. (in Chinese))
- [24] 刘曾美, 陈子燊, 吴俊校. 变化环境下治涝效益估算方法研究[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1081-1087. (LIU Zengmei, CHEN Zisheng, WU Junxiao. Study on the estimation methods of the direct benefit for waterlogging prevention under changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1081-1087. (in Chinese))
- [25] 何晓燕, 孙丹丹, 黄金池. 大坝溃决社会及环境影响评价[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1752-1757. (HE Xiaoyan, SUN Dandan, HUANG Jinchi. Assessment on social and environmental impacts of dam break [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(11): 1752-1757. (in Chinese))
- [26] 魏洪涛, 贾冬梅, 王延红. 巴家嘴水库除险加固工程效益的概率分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(9): 104-105. (WEI Hongtao, JIA Dongmei, WANG Yanhong. Probability analysis of reinforcement benefit for Bajiazui reservoir [J]. Yellow River, 2010, 32(9): 104-105. (in Chinese))
- [27] 齐建堂, 齐扬, 刘明杰. 黄壁庄水库副坝防渗墙防渗效果分析[J]. 大坝与安全, 2013(5): 40-43. (QI Jiantang, QI Yang, LIU Mingjie. Analysis on seepage prevention of cutoff wall of the auxiliary dam of Huangbizhuang reservoir [J]. Dam and Safety, 2013(5): 40-43. (in Chinese))
- [28] 徐光磊, 周克发. 病险水库除险加固工程质量评价研究[J]. 大坝与安全, 2010(1): 11-14. (XU Guanglei, ZHOU Kefa. Evaluation for the quality of reinforcement projects for defective reservoirs [J]. Dam and Safety,

- 2010(1): 11-14. (in Chinese))
- [29] 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.
- [30] 卢欣. 江西省土石坝除险加固后评价[D]. 南昌:南昌工程学院,2016.
- [31] 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.
- [32] 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. (HUANG Xianfeng, HUANG Xueqing, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of reservoir reinforcement based on GA-AHP and matter element analysis[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 141-145. (in Chinese))
- [33] 游黎. 基于密切值法在水库除险加固过程中质量监管的综合评价[J]. 人民珠江,2014,35(6):169-171. (YOU Li. Comprehensive evaluation of quality supervision in reservoir reinforcement process based on osculating value method[J]. Pearl River, 2014, 35(6): 169-171. (in Chinese))
- [34] 卢振园,唐德善,朱春光. 宿迁闸除险加固工程影响评价[J]. 水利科技与经济,2011,17(2):42-44. (LU Zhenyuan, TANG Deshan, ZHU Chunguang. Impact evaluation on Suqian sluice reinforcement project[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(2): 42-44. (in Chinese))
- [35] 马壮,封晓辉. 基于 AHP-SA-FC 法的水利加固改造工程过程后评价[J]. 水利规划与设计,2015(11):91-93. (MA Zhuang, FENG Xiaohui. Post process evaluation of reinforcement of water conservancy project based on AHP-SA-FC method[J]. Water Resources Planning and Design, 2015(11): 91-93. (in Chinese))
- [36] 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. (WANG Ning, SHEN Zhenzhong, XU Liqun, et al. Reinforcement effect evaluation of dangerous reservoir based on simulated annealing-analytic hierarchy process[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 65-67. (in Chinese))
- [37] 王少伟,苏怀智,付启民. 病险水闸除险加固效果评价指标体系的构建[J]. 水利经济,2018,36(2):7-9. (WANG Shaowei, SU Huaizhi, FU Qimin. Establishment of evaluation index system for the reinforcement effect of dangerous sluices[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 7-9, (in Chinese))
- [38] YASSER M, JAHANGIR K, MOHAMMAD A. Earth dam site selection using the analytic hierarchy process (AHP): a case study in the west of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(9): 3417-3426.
- [39] 盛金保,赫健,王昭升. 基于风险的病险水库除险决策技术[J]. 水利水电科技进展,2008,28(2):25-29. (SHENG Jinbao, HE Jian, WANG Zhaosheng. Decision-making for reservoir danger removal based on risk analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2008, 28(2): 25-29. (in Chinese))
- [40] 孙德忠,喻登科,田野. 一种基于专家组合多重相关的主观赋权方法[J]. 统计与决策,2012(19):88-90. (SUN Dezhong, YU Dengke, TIAN Ye. A subjective weighting method based on expert combination and multiple correlation[J]. Statistics and Decision, 2012 (19): 88-90. (in Chinese))
- [41] LEI Peng, CHANG Xiaolin, XIAO Feng, et al. Study on early warning index of spatial deformation for high concrete dam[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1607-1614.
- [42] GU Chongshi, ZHANG Zhijun, CAI Xin, et al. Application of entropy-based fuzzy matter-element analysis in seepage monitoring of RCC dam[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(1): 105-111.
- [43] 周红梅. 基于改进的 AHP-PP 模型的重力坝安全综合评价方法[J]. 水电能源科学,2014,32(2):90-92. (ZHOU Hongmei. Comprehensive evaluation of dam safety based on improved AHP-PP model[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2): 90-92. (in Chinese))
- [44] 朱蓓,赵博超. 基于综合赋权法的面板堆石坝面板健康状态的权重研究[J]. 水利水电技术,2014,45(11):49-53. (ZHU Bei, ZHAO Bochao. Comprehensive weighting method-based study on weight of health behavior of face slab for concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(11): 49-53. (in Chinese))
- [45] 杨海平. 基于 AHP-熵组合赋权的土石坝安全模糊评价[J]. 人民黄河,2013,35(6):116-118. (YANG Haiping. Fuzzy comprehensive evaluation of dam safety based on AHP-entropy combination weight method[J]. Yellow River, 2013, 35(6): 116-118. (in Chinese))
- [46] ZHANG Wen, CHEN Jianping, WANG Qing, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 1073-1100.
- [47] 陈旭东. 碾压混凝土坝工作性态演变分析方法研究[D]. 南京:河海大学,2014.
- [48] 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))
- [49] 王少伟,苏怀智,付启民. 病险水闸除险加固效果评价的点值与非点值权重[J]. 水电能源科学,2018,36(9):123-126. (WANG Shaowei, SU Huaizhi, FU

Qimin. Point and non-point value index weight for the reinforcement effect evaluation of dangerous sluices[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9): 123-126. (in Chinese))

[50] 何金平,高全,施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(11): 2977-2983. (HE Jinping, GAO Quan, SHI Yuqun. A multi-hierarchical comprehensive evaluation method of dam safety based on cloud model[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2016, 36(11): 2977-

2983. (in Chinese))

[51] 魏博文,黄海鹏,徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(增刊1):3092-3099. (WEI Bowen, HUANG Haipeng, XU Zhenkai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1): 3092-3099. (in Chinese))

(收稿日期:2017-08-31 编辑:雷燕)

+++++

(上接第 12 页)

[8] 王船海,南岚,李光炽. 河道型水库动库容在实时洪水调度中的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004,32(5):526-529. (WANG Chuanhai, NAN Lan, LI Guangzhi. Influence of dynamic capacity of river-typereservoirson real-time flood regulation [J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2004,32(5): 526-529. (in Chinese))

[9] 王英伟,夏建新,李文杰. 三峡水库运行后考虑重庆主城区防洪的坝前最佳水位[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(6):52-56. (WANG Yingwei, XIA Jianxin, LI Wenjie. Study on optimum pre-dam water level of Three Gorges Reservoir considering flood control of main urban area of Chongqing after reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(6):52-56. (in Chinese))

[10] 张曼,周建军,黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策[J]. 水资源保护,2016,32(4):1-10. (ZHANG Man,ZHOU Jianjun, HUANG Guoxian. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures [J] Water Resources Protection, 2016, 32(4): 1-10. (in Chinese))

[11] 王炎. 三峡水库动库容近似计算方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.

[12] 童思陈,周建军. 河道型水库动防洪库容近似计算方法[J]. 水力发电学报, 2003(4): 74-82. (TONG Sichen, ZHOU Jianjun. Study of the approximate method of calculating the flood control capacity of mountainous reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(4):74-82. (in Chinese))

[13] 童思陈,唐小娅,辛鑫. 三峡水库运行初期库区糙率特性分析[J]. 水电能源科学,2017,35(7):33-36. (TONG Sichen, TANG Xiaoya, XIN xin. Analysis of roughness property of Three Gorges Reservoir in initial operation period [J]. Water Resources and Power, 2017,35(7): 33-36. (in Chinese))

(收稿日期:2017-08-24 编辑:郑孝宇)

+++++

(上接第 18 页)

[5] 邓志民,张翔,肖洋,等. 鄱阳湖水位演变及影响因子分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2015,48(5):615-621. (DENG Zhimin,ZHANG Xiang,XIAO Yang,et al. Study of evolution of water level in Poyang Lake and impact factors[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015,48(5):615-621. (in Chinese))

[6] 万中英,钟茂生,王明文,等. 鄱阳湖水位动态预测模型[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2003,27(3): 232-236. (WAN Zhongying, ZHONG Maosheng, WANG Mingwen, et al. Dynamic prediction model of Poyang Lake's water level [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science Edition), 2003, 27(3): 232-236. (in Chinese))

[7] 董增川,梁忠民,李大勇,等. 三峡工程对鄱阳湖水资源生态效应的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 13-18. (DONG Zengchuan, LIANG Zhongmin, LI Dayong, et al. Influences of Three Gorges Project on water resources and ecological effects in Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012,40(1):13-18. (in Chinese))

[8] 刘琦俊,刘小东. 赣江南昌河段枯水位变化规律探讨[J]. 江西水利科技,2010,36(1):51-55. (LIU Qijun, LIU Xiaodong. Discussion of the variation law of low water level on Nanchang Reach of Ganjiang River[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,2010,36(1):51-55. (in Chinese))

[9] 郑海金,方少文,杨洁,等. 近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析[J]. 水土保持学报,2012,26(1):28-32. (ZHENG Haijin, FANG Shaoyun, YANG Jie, et al. Analysis on evolution characteristics and impacting factors of annual runoff and sediment in Gangjiang River during 1970-2009[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(1):28-32. (in Chinese))

(收稿日期:2017-08-22 编辑:郑孝宇)