

文章编号:0559-9350(2018)01-0026-10

## 大坝服役风险分析与管理研究述评

顾冲时<sup>1,2</sup>, 苏怀智<sup>1,2</sup>, 刘何稚<sup>2,3</sup>

(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. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 随着生产力水平的不断提升和风险理念的引入, 我国大坝安全管理正从传统的工程安全管理向工程风险管理方向发展。在对我国大坝风险分析与管理研究现状进行阐述的基础上, 论述了大坝风险标准的建立、风险识别、风险评估及风险处理等大坝风险分析与管理各环节的研究现状。认为今后应加强群坝风险标准及溃坝社会与环境影响、大坝风险识别量化模型、多失效模式大坝风险率计算、非概率及时变可靠性分析方法和群坝风险分析与管理等方面的研究, 以完善我国大坝风险分析与管理体制, 确保大坝健康长效服役。

**关键词:** 大坝; 服役风险; 标准; 识别; 评估; 处理

**中图分类号:** TV698

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20170721

目前, 我国已建成各类水库大坝9.8万余座, 数量位居世界首位, 这些工程在防洪、发电、灌溉以及供水等方面取得了巨大的社会和经济效益。然而, 由于相当一部分水库大坝建于20世纪50—70年代, 存在设计标准偏低、工程质量较差等问题, 导致现阶段我国大坝失事事件仍偶有发生。此外, 21世纪以来, 我国建设了一批包括小湾、溪洛渡、锦屏等在内的特大型工程, 如何保障大坝安全已成为当前水库大坝安全管理所面临的最严峻的技术挑战之一, 亟需改变我国传统的工程安全管理模式, 从工程安全管理向工程风险管理方向发展, 通过将单纯的工程安全纳入到社会发展系统当中, 统筹考虑工程安全与社会公共安全之间的关系, 从而有效地对大坝风险进行管理, 并为大坝安全管理部门的科学决策提供支持。

大坝风险分析与管理是通过管理来控制风险的一整套完整政策和程序, 是对风险进行识别、评价、处理和监控的系统管理过程<sup>[1-3]</sup>。大坝风险观念的提出是生产力水平提高的必然结果, 同时亦是管理观念上的重大转变。大坝风险分析与管理过程主要包括大坝风险标准的建立、风险识别、风险评估及风险处理四部分<sup>[4-5]</sup>。本文在阐述大坝风险分析与管理研究现状的基础上, 重点探讨大坝风险管理过程中各环节的研究现状, 最后对未来的发展提出一些建议。

## 1 发展沿革

风险管理概念起源于美国的军事工业领域, 1974年美国原子能委员会所发表的商用核电站风险评价报告引起了各国普遍重视, 至此以后, 风险分析技术在各领域飞速发展。1988年, 美国土木工

收稿日期: 2017-07-23; 网络出版日期: 2018-01-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180112.1005.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401601); 国家自然科学基金项目(51579083, 51479054)

作者简介: 顾冲时(1962-), 男, 江苏启东人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构安全监控与健康诊断等研究。

E-mail: csgu@hhu.edu.cn

通讯作者: 苏怀智(1973-), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事涉水工程安全防控与提能延寿研究。

E-mail: su\_huaizhi@hhu.edu.cn

工程师协会(ASCE)首先将风险分析方法应用于溢洪道的泄洪能力评估当中;随后,美国垦务局(USBR)提出了现场评分法用于衡量大坝的风险;美国国家气象局(NWS)研发了包括 DAMBRK 模型、BREACH 模型以及 FLDWAV 模型在内的各类风险分析模型应用于溃坝洪水计算。1991年,加拿大 BC Hydro 公司将风险管理技术应用于大坝的安全管理中,并根据业主大坝安全管理条例、国家法律、下游居民生命财产价值和业主赔偿能力等指标制定了大坝风险标准,成为国际上最早实行大坝风险管理的公司。此外,澳大利亚大坝委员会(ANCOLD)于1994—2000年间颁布了《风险评估指南》《大坝可接受防洪能力选择指南》《大坝溃决后果评价指南》等多部风险评价标准<sup>[6-7]</sup>,极大地推进了大坝风险分析和管理技术在实际工程中的应用。2000年,“风险分析在大坝安全决策和管理中的应用”被国际大坝委员会(ICOLD)和国际水利学会(IAHR)列为第20届国际大坝会议议题,标志着以风险分析为基础的大坝风险分析与管理技术得到了世界水利界的广泛关注和认可。

目前,加拿大、美国和澳大利亚等国家均已建立了较为完备的大坝风险分析与管理体制,我国大坝风险研究起步相对较晚,但也取得了一定的进展。过去我国在对大坝进行安全评价时,曾采用安全系数K值法以及结构可靠度分析法作为评价工程安全与否的方法。然而,水库大坝服役环境复杂且存在众多随机影响因素,仅靠计算防洪、抗滑、抗震等功能分项的安全系数K值并不能保证结构的绝对安全,而结构可靠度分析方法仅限于工程结构的力学问题,忽略了大坝失事风险及其对下游民众和社会所带来的影响。在此背景下,水利部大坝安全管理中心于1990年提出了水库大坝总体安全度(SD)法及相应的安全度判别标准,这成为我国坝工界从工程安全管理向风险管理观念转变和探索的重要转折点。随后,何金平等<sup>[8]</sup>提出了基于可靠度理论的大坝安全风险评估方法,探讨了大坝安全改造的风险决策模型;范子武等<sup>[9]</sup>借助数值模拟技术和GIS技术,对区域洪水的调度、调蓄、滞洪以及溃堤过程进行了模拟和风险评估;梅亚东等<sup>[10]</sup>研究了基于风险分析技术的大坝防洪安全设计标准;彭雪辉<sup>[11]</sup>讨论了大坝风险分析技术,并从不同层次对我国水库大坝的风险分析提出了建议;岳荣宾<sup>[12]</sup>结合模糊层次和投影寻踪法,以典型工程为例,分析了影响工程安全的主要因素,研究了风险产生的原因并提出了除险的具体建议;吴胜文等<sup>[13]</sup>通过熵权-集对分析方法对大坝安全等级及其风险发展趋势进行了评价和预测。此外,针对风险标准的建立、风险识别、风险评估及风险处理等大坝风险分析与管理过程中的各个环节,我国科研工作者也都开展了一系列的积极探索和研究,取得了一批有价值的成果,本文后续将对其进行详细阐述。

在大坝风险管理法规及标准建设方面,2010年以来,水利部先后颁布了SL483-2010《洪水风险图编制导则》、SL164-2010《溃坝洪水模拟技术规程》、SL602-2013《防洪风险评估导则》以及SL/Z720-2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》等多部技术导则。2014年,水利水电规划设计总院和南京水利科学研究院还共同编制了《水库大坝风险评估导则》,为我国大坝风险分析及管理的推广应用提供了法律基础与技术支持。

## 2 大坝风险标准的建立

大坝风险客观存在,工程界并不存在绝对安全的大坝,一般而言,大坝如满足风险标准即可认为其是安全的,因此,大坝风险标准可被理解为某一合理和公众普遍能够接受(容忍)的大坝失事风险尺度。现阶段我国大坝风险可根据溃坝后果划分为以下3类:生命风险、经济风险、社会与环境风险。另外,文献[14]将我国水库大坝风险划分为可接受风险、可容忍风险、不可接受风险和极高风险共4个区域,分别对应低、中、高、极高风险,用目标线、容许线和高风险线区分。大坝风险标准的建立需综合考虑可接受风险和可容忍风险等方面来进行。风险标准的确定原则一般包括英国的ALARP原则(最低合理可行原则,As Low As Reasonably Practicable)、法国的GAMAB原则(比较原则,Globalement Au Moins Aussi Bon)以及德国的MEM原则(最小内因死亡率原则,Minimum Endogenous Mortality)3种。其中,ALARP原则应用最为广泛,该原则要求风险在合理可行情况下应尽可能的低,且只有在减少风险不可行,或投入经费与减少的风险之间明显失衡时,风险才能被容忍。目

前,我国有关生命风险标准的研究相对较多,而关于经济风险、环境风险和社会风险标准的研究报道还较少。

生命风险标准包括个体生命风险标准和群体生命风险标准,其中个体生命风险标准可采用溃坝概率和年个体死亡率的乘积来度量,而群体生命风险标准可通过溃坝概率和生命损失的乘积来确定。李雷等<sup>[15]</sup>考虑我国大中型水库和小型水库安全状况和管理水平之间的差距,分别提出了大中型水库大坝和小型水库大坝的社会生命风险标准;宋敬衡等<sup>[16]</sup>基于我国东西部地区人口以及经济水平的差异,研究了生命风险的区域划分标准;周建平<sup>[17]</sup>初步探讨了影响生命风险标准制定的因素,并据此提出了我国水库大坝统一的个人生命风险和社会生命风险标准;周兴波等<sup>[18]</sup>根据我国大坝失事统计数据,给出了符合我国国情的大坝社会可接受风险控制标准的建议值;李宗坤等<sup>[19]</sup>通过将大坝安全风险标准与现行安全标准有效衔接,论证了大坝社会生命风险标准和经济风险标准相关参数的选取方法,并构建了相应标准;彭雪辉等<sup>[14]</sup>根据水库大坝风险分区,结合F-N线法和ALARP原则介绍了生命风险标准的建立方法,给出了个体和群体生命风险标准。

经济风险标准一般根据业主所能承受的风险能力确定,其重点在于依据ALARP原则尽可能地降低经济风险。需要注意的是,我国东西部经济发展具有明显的不均衡性,若工程安全标准一致,东部地区大坝溃坝所造成的经济损失要远大于西部地区的损失,因此,在制定经济风险标准时应重点考虑东西部地区经济水平的差异,并根据各地经济发展水平以及经济风险承受能力分别制定适宜的经济风险标准。

环境风险是指溃坝对生态、自然及人文环境所带来的风险,由于溃坝所造成的环境损失很难用货币进行定量计算,因此有关环境风险标准的制定研究在国内外均较少。李雷等<sup>[15]</sup>建议可根据溃坝破坏力的大小和溃坝概率来拟定环境风险标准。社会风险标准研究方面,考虑到溃坝所造成的社会风险与大坝规模、下游人口、城镇、交通干线及企业相关,一些学者提出可采用综合影响指数控制溃坝概率来制定符合我国国情的相关社会风险标准。王仁钟等<sup>[20]</sup>量化分析了我国社会与环境影响要素,借助F-N线法建立了包括大坝社会风险与环境风险标准的大坝风险标准体系;彭雪辉等<sup>[14]</sup>根据水库大坝风险分区,给出了社会与环境风险标准的建立方法及相应的目标值。

### 3 大坝风险识别

风险识别是进行大坝安全风险分析与管理的基础环节,是风险评估和风险处理的前提,其目的在于发现大坝运行过程中潜在的风险,并对风险特征以及有可能影响大坝安全的风险因素进行描述,进而确定溃坝模式和溃坝路径。由于大坝服役环境复杂,在多重环境因素和力学荷载的共同作用下,其工作性态不断变化,因此,风险识别应定期进行并贯穿大坝运行的全过程。

影响大坝安全的风险因素主要包括工程风险因素、人为风险因素、环境风险因素三部分。根据对我国相关溃坝资料的统计分析可知,工程风险因素主要表现在大坝防洪标准低、坝体质量差等方面。人为风险因素主要表现在管理体制落后和非工程措施不完善等方面,我国工程普遍存在重建轻管问题,但往往正是由于管理的不到位以及部分管理人员风险意识淡薄,导致大坝老化加剧。此外,应急预案和措施与现实需求脱节,水库下游地区的发展规划缺少水库管理部门的参与等问题也都在一定程度上增加了人为风险。环境风险因素包括自然环境因素和社会环境因素,超标准洪水、全球气候变化、战争及政治等因素均属其中。

在对上述风险因素进行分析的基础上,结合大坝风险调查,明确可能引起大坝失事的潜在风险源,进而确定溃坝模式和溃坝路径。其中,如何及早发现潜在风险源是目前大坝风险管理的重点和难点。对此,李民等<sup>[21]</sup>提出组织专家开展现场检验,并通过自由讨论的方式确定大坝潜在的溃坝模式;周元春等<sup>[22]</sup>探讨了失事树分析法及时间概率计算方法等大坝安全管理中的风险识别方法;苏怀智等<sup>[23]</sup>研究了风险分析的基本原理,构建了三层风险分析的递阶层次结构体系,并利用改进层次分析法识别了影响大坝风险的主要因素;徐强<sup>[24]</sup>融合主层次分析法、模糊理论和遗传算法,构建了大

坝运行风险识别模型；刘德峰等<sup>[25]</sup>通过对小型水库大坝溃坝历史资料进行统计分析，结合事件树法建立了小型水库大坝的主要溃坝模式和溃坝路径；陈兵<sup>[26]</sup>利用灰色系统评估方法对大坝系统进行风险评估；李晓璐等<sup>[27]</sup>综合考虑影响大坝安全运行的定量因素和定性因素，运用层次分析法和模糊数学建立了大坝安全分析的多层次模糊综合评价模型；严磊<sup>[28]</sup>基于改进的区间层次分析法，识别主要溃坝模式及路径，并据此开发了基于IAHP的风险识别程序；李浩瑾<sup>[29]</sup>基于层次分析法和改进粒子群算法筛选影响大坝运行安全的主要风险因素，建立了大坝风险因素识别模型；黄海鹏<sup>[30]</sup>利用故障树分析法，结合粗集理论，研究了土石坝服役风险成因数据挖掘方法；张振伟等<sup>[31]</sup>利用置信结构和灰色关联度理论，结合工程实例识别了土石坝溃坝的关键风险要素。

## 4 大坝风险评估

大坝风险评估是指在识别威胁大坝安全运行潜在风险要素的基础上，通过分析溃坝概率及溃坝后果，并将分析结果与大坝风险标准进行对比，判断现有风险是否能够容忍的决策支持过程。大坝风险评估可采用定性/半定量分析和定量分析进行，其中定性/半定量分析主要用于筛选评价，其他一般均采用定量分析。

**4.1 大坝失事风险率分析** 尽可能准确估算不同失事模式下大坝失事风险率是大坝风险评价的关键问题之一，精确确定各种模式的风险率在实际操作中具有一定困难，当前一般通过数值计算和主观判断相结合的方法来得到各模式的失效率。

**4.1.1 失事风险率分析** 大坝失事风险率量化分析是大坝风险分析与管理过程中的重要环节。目前，关于单一失效模式风险率的研究较多，一般常用计算方法有直接积分法、一次二阶矩法、Monte-Carlo法、统计矩法、可靠度指标法以及随机有限元法等。胡国华等<sup>[32]</sup>考虑大坝系统的随机不确定性以及灰色不确定性，基于灰色-随机风险率方法和MATLAB计算研究了大坝坝坡失稳风险率；席秋义<sup>[33]</sup>提出了梯级水库防洪安全风险率评估方法，构建了单一水库风险率和梯级水库系统失事风险率之间的函数关系；解家毕等<sup>[34]</sup>考虑堤防工程可能出现的破坏模式，采用事件树法对每种破坏模式进行了风险分析；刘海娇<sup>[35]</sup>结合毕肖普法和MC法计算坝坡失稳概率，分析坝坡失稳风险；雷瑞丽等<sup>[36]</sup>考虑入库洪水等不确定因素，采用随机微分方程量化分析了大坝的漫顶风险；王超<sup>[37]</sup>利用Monte-Carlo法对洪水入库及导流建筑物泄流过程进行模拟，构建了施工导流系统风险率分析模型。

大坝风险产生的根源是工程本身和服役环境的复杂性以及人们认知局限性所造成的各种不确定因素。可靠度方法充分考虑了各种不确定因素对工程安全的影响，因此能够较全面地反映大坝的安全状况。大坝可靠度和失事风险率其实是从对立的角度反映大坝的安全状态，因此国内不少学者同样基于结构可靠性理论开展了大坝失事风险分析。吴世伟等<sup>[38]</sup>构建了基于条件概率的拱坝体系可靠度公式，并据此给出了最大可能失效模式及其相应的可靠度；江爱民等<sup>[39]</sup>结合一阶二次矩法和随机边界元法，分别对大坝的强度以及稳定可靠度进行了计算分析；杨海霞<sup>[40]</sup>基于分载法对拱坝的可靠度进行了研究；陈刚等<sup>[41]</sup>将Hsofer-Lind定义与复合形法相结合，并依托某实际工程研究了拱坝的结构可靠度；封伯昊等<sup>[42]</sup>提出损伤边界面概念，并结合响应面法和有限元计算，构建了混凝土大坝可靠度分析模型；范武强<sup>[43]</sup>考虑影响大坝安全各随机变量的变异性，采用响应面法拟合重力坝的功能函数，对各失效模式下的重力坝可靠度进行了分析计算；范书立<sup>[44]</sup>利用响应面法和可靠性指标，结合系统可靠度理论，探讨了不同失效路径下的重力坝系统可靠度；徐强等<sup>[45]</sup>基于贝叶斯理论和Cauchy-Schwarz不等式对大坝体系的可靠度进行了探讨；张芝玲<sup>[46]</sup>提出了改进的响应面法，通过对拱坝进行三维有限元计算，分析了坝体可靠度。

传统工程可靠度由概率定义，要求统计信息量充足，同时分析结果对分布参数极为敏感，然而受试验或监测条件的限制，有些影响大坝安全的不确定因素数据非常匮乏，这导致了传统可靠性分析方法在工程应用时存在局限性。非概率可靠性分析方法基于稳健性概念，其对原始数据要求较低，利用凸集合模型描述和区间分析方法计算，能在原始信息较少的情况下实现工程可靠性分析，

因此该方法开始逐渐应用于在坝工风险分析中。张勇等<sup>[47]</sup>基于非概率可靠度分析方法,结合响应面法以及 ANSYS 有限元计算对小湾工程进行了可靠度分析;夏雨等<sup>[48]</sup>采用非概率凸集模型结合有限元分析方法,确定了各失效模式下的坝体非概率可靠度指标;胡海涛<sup>[49]</sup>将非概率可靠度指标引入堤防风险率分析中,提出了堤防非概率风险率的计算方法;于生飞<sup>[50]</sup>基于边坡稳定安全系数区间,提出了边坡稳定性非概率可靠度模型;袁慕勇等<sup>[51]</sup>构建了基于非概率方法的可靠度指标计算模型,并以碾压混凝土重力坝为例研究了其抗滑稳定失效模式及非概率可靠度指标。

4.1.2 体系风险率分析 大坝失事风险率量化分析除了上述针对单一失效模式进行分析外,还应关注多重失效模式下体系风险率的计算。多重失效模式重点关注各失效模式之间的相关性,通常情况下,各失效模式按逻辑关系可分为串联体系、并联体系以及串并联混合体系。现阶段,针对大坝多重失效模式下的风险率研究相对较少,李云贵等<sup>[52]</sup>考虑了各失效模式间的线性相关性,提出了基于条件概率和数值分析方法的体系可靠度近似计算公式;贡金鑫等<sup>[53]</sup>提出了采用二元 Taylor 级数展开进行串联体系可靠度计算的方法;陈在铁等<sup>[54]</sup>在分析高拱坝主要失效模式的基础上,探究了各失效模式的相关程度以及多失效模式下的高拱坝失效概率;李典庆等<sup>[55]</sup>针对岩质边坡所包含的多种失效模式,研究了基于多失效模式相关性的岩质边坡体系可靠度分析方法;苏怀智等<sup>[56-60]</sup>探讨了多种失效模式下大坝系统的失效概率,分析了各失效模式间的相关性对大坝体系可靠指标的影响。

4.1.3 时变风险率分析 建造在复杂地基上的大坝,在各种静、动力荷载以及环境荷载的耦合作用下,其工作性态不断发生变化,此外,大坝所受荷载的分布、结构特点等不确定因素同样具有时变特性,如大坝服役期间的结构抗力会随时间而衰减,因此,需要从时变风险率或时变可靠度的角度对大坝结构的安全性进行客观评价,以期实现大坝管理风险的准确评估。目前,时变风险率或时变可靠度在水工领域的应用研究相对较少,刘宁等<sup>[61]</sup>综合考虑重力坝徐变应力场以及混凝土强度的随机性,利用随机有限元法计算了重力坝的时变可靠度;管昌生等<sup>[62]</sup>建立了三峡大坝厂房坝段三维有限元模型,并基于随机时变可靠性理论对坝段整体结构时变可靠度进行了计算分析;姜树海等<sup>[63]</sup>考虑大坝工程老化过程中的时变效应,通过分析影响大坝防洪安全各种随机量的时变特性,构建了大坝防洪时变风险率模型;苏怀智等<sup>[64]</sup>基于模糊事件概率理论和信息熵理论,研究了大坝运行过程中各风险因子随时间的变化趋势,建立了大坝模糊时变风险率分析模型;严磊<sup>[28]</sup>通过平稳化处理影响大坝风险率的非平稳时变随机变量,构建了大坝的时变风险率模型;张社荣等<sup>[65]</sup>考虑大坝风险因子的时变特性,结合改进层次法、时变可靠度理论以及风险率阈值,提出了大坝时变风险率评估方法。

4.2 大坝失事后果评价 大坝失事后果评价主要分为生命损失评价、经济损失评价和社会与环境影响评价三部分。

4.2.1 生命损失评价 影响溃坝生命损失的因素众多,李雷等<sup>[15]</sup>认为,风险人口、溃坝洪水的严重程度、警报时间以及公众对事件严重性的理解程度是其中几个较为关键的影响因素。国外针对生命损失评价的研究起步较早,取得的成果也较为丰硕。1993年,DeKay 等<sup>[66]</sup>提出了考虑洪水严重程度的溃坝生命损失评价估算模型;1999年,Graham<sup>[67]</sup>将公众对事件严重性的理解程度划分为明确理解和模糊理解两种模式,并给出了基于洪水严重程度以及警报时间的溃坝生命损失建议取值范围;2001年,Reiter<sup>[68]</sup>在 Graham 法的基础上,额外考虑溃坝原因和类型等一些其他因素,并将溃坝淹没区划分为若干子区域,构建了更加细化的溃坝生命损失估算修正模型,即 Rescdam 模型;Assaf 等<sup>[69]</sup>将概率理论风险性分析和溃坝模型模拟技术相结合,基于可靠度概念提出了溃坝生命损失评价方法,开拓了溃坝生命损失研究的新方向。随着大坝风险管理理念的深入,我国科研工作者也相继开展了一系列有关溃坝生命损失评价的研究。王志军等<sup>[70]</sup>分别采用模糊物元和指数平滑法对溃坝生命损失进行了估算;罗显枫等<sup>[71]</sup>将 BP 神经网络引入溃坝生命损失评价中,构建了相应的分级评定模型;王晓航等<sup>[72]</sup>结合 GIS 技术和线性加权模型估算了不同地域的溃坝生命损失;王君等<sup>[73]</sup>探讨了可变模糊聚类迭代方法在溃坝生命损失预测中的应用;胡德秀等<sup>[74]</sup>考虑溃坝生命损失风险率的不确定性,提出了基于不确定性分析的溃坝生命损失评价方法;此外,董建良<sup>[75]</sup>、姜振翔等<sup>[76]</sup>和侯保灯<sup>[77]</sup>等还分别将数字高程模型、贝叶斯支持向量机和灰色关联分析方法应用于溃坝生命损失评价

中，取得了良好的效果。

4.2.2 经济损失评价 溃坝经济损失评价方面，我国相对较为重视，现阶段有关溃坝经济损失的研究也相对较多。一般而言，溃坝经济损失可分为直接经济损失和间接经济损失。《水库大坝风险评估导则》指出：直接经济损失可利用分类损失率法、单位面积综合损失法和人均综合损失法估算；间接经济损失可利用系数折算法和调查分析法估算。此外，考虑到溃坝事件往往具有较强的突发性和毁灭性，一些学者还专门针对溃坝所引起的经济损失开展了一系列研究，如施国庆等<sup>[78]</sup>通过将溃坝经济损失细分为洪水淹没损失、库区塌岸损失以及溃坝工程损失三类，研究了每种经济损失所对应的计算方法；杜丙涛等<sup>[79]</sup>考虑溃坝后关联区域间的拓扑关系，建立了溃坝后地区经济损失范围、大小及持续时间的相关关系；王志军等<sup>[80]</sup>采用物元模型对溃坝洪水淹没范围进行划分，给出了不同分区的溃坝经济损失率建议表；曲丽英<sup>[81]</sup>探讨了GIS技术在溃坝直接经济损失评价过程中的空间分析和展布作用；刘欣欣等<sup>[82]</sup>将流速及预警时间修正系数引入溃坝经济损失评估，提出了基于损失率修正模型的溃坝洪水经济损失评价方法。

4.2.3 社会与环境影响评价 关于溃坝社会与环境影响评价研究，目前我国仍处于起步阶段，但国内一些学者对此进行了积极的探索。何晓燕等<sup>[83]</sup>基于模糊数学方法和层次分析法，提出了大坝溃坝社会与环境影响评价模型；张莹<sup>[84]</sup>采用能值足迹法相对量化地评估了溃坝的社会与环境影响；程莉等<sup>[85]</sup>引入模糊数学理论，重点分析了溃坝的环境影响。

此外，还有一些学者综合考虑溃坝对生命损失、经济损失以及社会与环境的影响，对溃坝后果综合评价方法进行了研究，如周克发等<sup>[86]</sup>考虑我国当前社会经济发展状况，构建了溃坝生命损失、经济损失及社会与环境影响随社会经济发展而变化的动态预测评价模型；赵利等<sup>[87]</sup>通过确立影响溃坝后果的定量和定性隶属函数，利用灰色模糊评价方法构建了溃坝后果评价模型；程翠云等<sup>[88]</sup>运用溃坝后果评价体系标准以及属性理论对溃坝后果进行评价；李东旭<sup>[89]</sup>结合溃坝后果综合评价因子，提出了溃坝后果多层次模糊综合评价方法；邹强等<sup>[90]</sup>将属性区间识别模型引入溃坝后果综合评价体系，结合实例研究了溃坝后果综合评价方法；薛文等<sup>[91]</sup>基于模糊层次分析法，提出了溃坝后果风险分析和计算模型。

## 5 大坝风险处理

基于大坝风险评估结果，选择合适的风险处理方案。对于风险可接受的大坝，其暂时可不进行加固处理；对于风险可容忍的大坝，应采用ALARP原则分析判断是否采取措施降低风险；对于风险不可接受的大坝，应立即采取措施对降低大坝风险。随着风险分析理念的不断深入，风险处理措施也不再局限于传统的工程措施，包括加强安全监控、编制应急预案等在内的非工程措施越来越受到重视。目前，风险处理方法主要包括以下4种：

(1)降低风险。包括降低溃坝概率和减少溃坝损失两方面。前者主要通过对病险大坝进行除险加固处理、加强大坝安全监控等措施降低溃坝概率；后者主要通过建立应急预案，迁移风险人口等措施减少溃坝损失。

(2)分担风险。立法、合同和保险等均是分担风险的有效手段，通过上述手段，可将溃坝损失的责任或负担进行转移。但目前我国相关领域的研究较少，尚未针对大坝建立有效的风险分担手段。

(3)规避风险。当大坝风险分析结果超出不可接受风险标准，且对大坝进行风险处理所产生的费用和取得的效益极不相称时，可考虑采取规避风险的方法，如空库、降低水位运行或将大坝进行报废退役等。

(4)保留风险。包括主动保留风险和被动保留风险两方面。主动保留风险基于对大坝风险后果的准确把握，是主动承担风险的一种决策，如对风险进行降低或转移后的剩余风险；被动保留风险则是在无法准确认识潜在风险，或在风险已知情况下，受到条件限制而被动地对风险进行保留。

## 6 发展趋势和亟待解决的问题

尽管大坝风险分析和管理研究已取得了一批有价值的成果,且部分成果已在大坝安全管理工作中得到应用,但仍有以下几方面问题值得进一步探讨:

(1)现阶段我国大坝管理体制还不够健全,分担风险的手段还较为匮乏,应尽快协调大坝风险管理体系与现行工程安全管理体系之间的关系,研究并建立符合中国国情的群坝风险标准,进一步加强大坝失事造成的社会与环境影响的研究。

(2)大坝运行受到诸多风险因子的影响,如何厘清各风险因子之间的关系,并挖掘出其中的关键影响因子及主要失事路径,从而对风险进行有效识别和分析对大坝风险管理具有重要意义。然而,目前大坝风险识别的研究成果大多基于专家的经验分析或历史统计资料概率,主观影响较大。因此,应进一步探讨将专家主观经验和客观定量分析相结合的大坝风险识别方法。

(3)大坝系统是一个复杂的灾变系统,可能存在多种失效模式,而现阶段的研究中多假定各失效模式之间相互独立,或仅研究某一种失效模式下的失效概率,忽略溃坝多重失效模式之间的相关性,这将导致评价结果与客观实际不相符。探究大坝系统中各失效模式之间的串联、并联及串并联关系,并构建具有多失效模式的大坝风险率求解模型是大坝风险分析的发展趋势。

(4)传统可靠度分析方法对原始数据要求较高,但受到多种原因的限制,大坝系统中往往存在某些影响因子数据较为缺乏的现象,因此,大坝风险评估中的非概率可靠性分析方法已得到广泛关注,但目前针对溃坝非概率可靠性分析的研究还较少。此外,大坝服役环境复杂,众多风险因子均会随时间而发生变化,因此,尚需考虑大坝可靠度各影响因素的时变特征,进一步探索大坝时变风险率模型构建方法。

(5)基于流域的水能资源梯级开发已成为我国水利水电发展的新趋势,然而,现阶段研究成果多为单个大坝的风险分析模型或方法,与单个大坝相比,梯级水库坝群风险分析过程更为复杂,如何在单个大坝失效概率研究的基础上,构建坝群系统整体失效概率的评价模型和方法,并据此对坝群进行风险分析与管理是科研工作者需要深入研究的课题。

## 7 结语

大坝风险分析与管理是一个多学科交叉和融合的复杂课题,其突破了我国大坝安全管理的传统模式,通过统筹考虑工程安全与社会公共安全之间的关系,客观评估大坝安全状态,分析大坝失事概率及失事可能引起的各类影响,进而决策是否采取除险处理措施,实现对大坝安全的科学管理。尽管我国在该领域已取得一定成果,但大坝风险分析与管理的工作仍需不断改进和创新,为进一步建立符合我国实际情况的大坝风险管理体系,提升我国水库大坝安全管理水平奠定科学基础。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] HARTFORD D N, BAECHE G B . Risk and Uncertainty in Dam Safety[M] . Thomas Telford, 2004 .
- [ 2 ] STEWART R A . Dam Risk Management[C]//Proceedings of the ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics . 2000 .
- [ 3 ] WU Zhongru, SU Huaizhi, GUO Haiqing . Risk assessment method of major unsafe hydroelectric project[J] . Science China Technological Sciences, 2008, 51(9): 1345-1352 .
- [ 4 ] 彭雪辉,赫健,施伯兴 . 我国水库大坝风险管理[J] . 中国水利, 2008(12): 10-13 .
- [ 5 ] SU Huaizhi, WEN Zhiping . Interval risk analysis for gravity dam instability[J] . Engineering Failure Analysis, 2013, 33: 83-96 .

- [ 6 ] ANCOLD . Guidelines on Assessment of the Consequences of Dam Failure[R] . Australian National Committee on Large Dams Hobart, 2000 .
- [ 7 ] 楼渐逵 . 加拿大 BC Hydro 公司的大坝安全风险管理体系[J] . 大坝与安全, 2000 (4): 7-11 .
- [ 8 ] 何金平, 李珍照 . 大坝安全改造风险决策模型的探讨[J] . 武汉水利电力大学学报, 1997 (2): 43-45 .
- [ 9 ] 范子武, 姜树海 . 蓄、滞洪区的洪水演进数值模拟与风险分析[J] . 水利水运科学研究, 2000 (2): 1-6 .
- [ 10 ] 梅亚东, 谈广鸣 . 大坝防洪安全评价的风险标准[J] . 水电能源科学, 2002, 20(4): 8-10 .
- [ 11 ] 彭雪辉 . 风险分析在我国大坝安全上的应用[D] . 南京: 南京水利科学研究所, 2003 .
- [ 12 ] 岳荣宾 . 模糊层次和投影寻踪法在大坝安全风险评价中的应用[D] . 济南: 山东大学, 2009 .
- [ 13 ] 吴胜文, 秦鹏, 高健, 等 . 熵权-集对分析方法在大坝运行风险评价中的应用[J] . 长江科学院院报, 2016, 33(6): 36-40 .
- [ 14 ] 彭雪辉, 蔡跃波, 盛金保, 等 . 中国水库大坝风险标准研究[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2015 .
- [ 15 ] 李雷, 王仁钟, 盛金保, 等 . 大坝风险评价与风险管理[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2006 .
- [ 16 ] 宋敬衡, 何鲜峰 . 我国溃坝生命风险分析方法探讨[J] . 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 628-633 .
- [ 17 ] 周建平, 杜效鹄 . 我国水电站大坝溃坝生命风险标准讨论[J] . 中国水能及电气化, 2010, 36(5): 14-18 .
- [ 18 ] 周兴波, 周建平, 杜效鹄, 等 . 我国大坝可接受风险标准研究[J] . 水力发电学报, 2015, 34(1): 63-72 .
- [ 19 ] 李宗坤, 葛巍, 王娟, 等 . 中国水库大坝风险标准与应用研究[J] . 水利学报, 2015, 46(5): 567-573 .
- [ 20 ] 王仁钟, 李雷, 盛金保 . 水库大坝的社会与环境风险标准研究[J] . 安全与环境学报, 2006, 6(1): 8-11 .
- [ 21 ] 李民, 方莉 . 大坝安全检查和失事模式评估[J] . 大坝与安全, 2005(4): 11-17 .
- [ 22 ] 周元春, 薛桂玉, 何金平, 等 . 大坝安全风险初探[J] . 中国农村水利水电, 2005(10): 47-49 .
- [ 23 ] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping, et al . Evaluation model for service life of dam based on time-varying risk probability[J] . Science China Technological Sciences, 2009, 52(7): 1966-1973 .
- [ 24 ] 徐强 . 大坝的风险分析方法研究[D] . 大连: 大连理工大学, 2008 .
- [ 25 ] 刘德峰, 宰维东, 谢营 . 小型水库大坝溃坝风险识别研究[J] . 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 138-141 .
- [ 26 ] 陈兵 . 大坝溃决风险灰色评估理论与方法研究[D] . 武汉: 华中科技大学, 2010 .
- [ 27 ] 李晓璐, 李春雷, 李德玉, 等 . 基于多层次模糊分析法的大坝安全评价研究[J] . 人民长江, 2010, 41(17): 92-95 .
- [ 28 ] 严磊 . 大坝运行安全风险分析方法研究[D] . 天津: 天津大学, 2011 .
- [ 29 ] 李浩瑾 . 大坝风险分析的若干计算方法研究[D] . 大连: 大连理工大学, 2012 .
- [ 30 ] 黄海鹏 . 土石坝服役风险及安全评估方法研究[D] . 南昌: 南昌大学, 2015 .
- [ 31 ] 张振伟, 申思, 彭高辉 . 基于灰色置信结构的 FMEA 的土石坝溃坝风险分析及应用[J] . 水力发电, 2016, 42(4): 61-64 .
- [ 32 ] 胡国华, 夏军 . 风险分析的灰色-随机风险率方法研究[J] . 水利学报, 2001(4): 1-6 .
- [ 33 ] 席秋义 . 水库(群)防洪安全风险率模型和防洪标准研究[D] . 西安: 西安理工大学, 2006 .
- [ 34 ] 解家毕, 孙东亚 . 事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 133-137 .
- [ 35 ] 刘海娇 . 土石坝漫坝与坝坡失稳风险分析研究及应用[D] . 天津: 天津大学, 2007 .
- [ 36 ] 雷瑞丽, 张贵金, 陈雄波 . 基于随机微分方程的大坝漫顶风险研究[J] . 人民黄河, 2010, 32(4): 114-115 .
- [ 37 ] 王超 . 基于 Monte-Carlo 方法的重建工程施工导流风险分析[J] . 水利科技与经济, 2014, 20(1): 4-6 .
- [ 38 ] 吴世伟, 张思俊, 吕泰仁, 等 . 拱坝的失效模式与可靠度[J] . 河海大学学报(自然科学版), 1992, 20(2): 88-96 .
- [ 39 ] 江爱民, 丁皓江 . 随机边界元法在大坝可靠性分析中的应用[J] . 工程力学, 1996, 13(1): 81-85 .
- [ 40 ] 杨海霞 . 基于分载法的拱坝可靠度分析[J] . 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(6): 23-26 .
- [ 41 ] 陈刚, 张林, 陈健康, 等 . 复合形法在拱坝结构可靠度分析中的应用[J] . 水利学报, 2003(2): 98-101 .
- [ 42 ] 封伯昊, 张立翔, 金峰 . 基于损伤的混凝土大坝可靠度分析[J] . 工程力学, 2005, 22(3): 46-51 .
- [ 43 ] 范武强 . 基于响应面法的混凝土重力坝可靠度分析[D] . 大连: 大连理工大学, 2007 .
- [ 44 ] 范书立 . 混凝土重力坝的动力模型破坏试验及可靠性研究[D] . 大连: 大连理工大学, 2007 .

- [ 45 ] 徐强, 陈健云, 李静, 等. 基于贝叶斯理论的大坝体系可靠度计算方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 84-89.
- [ 46 ] 张芝玲. 基于改进响应面法的拱坝可靠度分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [ 47 ] 张勇, 赖国伟, 程睿, 等. 高拱坝的非概率可靠性分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(5): 62-65.
- [ 48 ] 夏雨, 张仲卿, 赵小莲, 等. 基于非概率可靠度理论的拱坝安全度评价[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 79-83.
- [ 49 ] 胡海涛. 堤防风险率计算的非概率方法[J]. 中国水运, 2011, 11(11): 172-174.
- [ 50 ] 于生飞. 基于区间不确定方法的边坡稳定性分析及非概率可靠度评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [ 51 ] 袁慕勇, 陆廷春, 徐宝松, 等. 基于非概率方法的碾压混凝土重力坝可靠度计算[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 29-33.
- [ 52 ] 李云贵, 赵国藩. 结构体系可靠度的近似计算方法[J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 70-76.
- [ 53 ] 贡金鑫, 赵国藩. 串联结构体系可靠度的二元泰勒级数展开[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 80-86.
- [ 54 ] 陈在铁, 任青文. 具有多个失效模式的高拱坝失效概率计算[J]. 水利水运工程学报, 2007(2): 54-57.
- [ 55 ] 李典庆, 周创兵. 考虑多失效模式相关的岩质边坡体系可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 541-551.
- [ 56 ] SU Huaizhi, HU Jiang, YANG Meng, et al. Assessment and prediction for service life of water resources and hydropower engineering[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 3005-3019.
- [ 57 ] SU Huaizhi, HU Jiang, LI Jinyou, et al. Deep stability evaluation of high-gravity dam under combining action of powerhouse and dam[J]. ASCE International Journal of Geomechanics, 2013, 13(3): 257-272.
- [ 58 ] SU Huaizhi, LI Jinyou, WEN Zhiping, et al. Dynamic non-probabilistic reliability evaluation and service life prediction for arch dams considering time-varying effects[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(15/16): 6908-6923.
- [ 59 ] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping. Service life predicting of dam systems with correlated failure modes[J]. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(3): 252-269.
- [ 60 ] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit-cost ratio using a life quality index[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 799-817.
- [ 61 ] 刘宁, 刘光廷. 随机徐变应力影响下重力坝时变可靠度初探[J]. 水利学报, 1999(5): 50-57.
- [ 62 ] 管昌生, 王元斌. 三峡大坝厂房坝段结构时变动力可靠度分析[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(4): 81-84.
- [ 63 ] 姜树海, 范子武. 时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 425-430.
- [ 64 ] SU Huaizhi, WEN Zhiping, SUN Xiaoran, et al. Time-varying identification model for dam behavior considering structural reinforcement[J]. Structural Safety, 2015, 57: 1-7.
- [ 65 ] 张社荣, 严磊. 考虑时变效应的水电工程运行安全风险分析方法[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 51-55.
- [ 66 ] DeKAY M L, McCLELLAND G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis, 1993, 13(2): 193-205.
- [ 67 ] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[M]. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, 1999.
- [ 68 ] REITER P. Loss of life caused by dam failure: the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi Dam in Seinajoki[R]. Helsinki: PR Water Consulting Ltd., 2001.
- [ 69 ] ASSAF H, HARTFORD D, CATTANACH J. Estimating dam breach flood survival probabilities[J]. ANCOLD Bulletin, 1997(5): 23-42.
- [ 70 ] 王志军, 顾冲时, 刘红彩. 基于模糊物元与指数平滑法的溃坝生命损失估算[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 25-28.
- [ 71 ] 罗显枫, 周晶, 赵利, 等. 基于BP神经网络的溃坝生命损失评价研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(12): 18-19.
- [ 72 ] 王晓航, 盛金保, 张行南, 等. 基于GIS技术的溃坝生命损失预警综合评价模型研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 72-78.

- [ 73 ] 王君,袁永博.基于可变模糊聚类迭代模型的溃坝生命损失预测[J].水电能源科学,2012,30(6):82-85.
- [ 74 ] 胡德秀,周孝德,杨杰.基于不确定性分析的溃坝失事生命损失风险概率估算方法[J].西安理工大学学报,2008,24(2):133-138.
- [ 75 ] 董建良.基于数字高程模型DEM的溃坝生命损失风险分析[J].人民珠江,2014,35(3):22-24.
- [ 76 ] 姜振翔,徐镇凯,彭圣军,等.基于贝叶斯支持向量机的溃坝生命损失风险评价方法[J].水力发电,2014,40(4):31-34.
- [ 77 ] 侯保灯.基于灰色关联分析法的溃坝生命损失综合评价模型[J].水力发电,2012,38(10):76-80.
- [ 78 ] 施国庆,朱淮宁,荀厚平,等.水库溃坝损失及其计算方法研究[J].灾害学,1998(4):28-33.
- [ 79 ] 杜丙涛,袁永博.溃坝后关联区域损失模型研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):64-68.
- [ 80 ] 王志军,宋文婷,马小童.溃坝经济损失评估方法研究[J].长江科学院院报,2014,31(2):30-34.
- [ 81 ] 曲丽英.GIS在水库溃坝直接经济损失评估中的作用研究[J].水利科技,2015(3):10-12.
- [ 82 ] 刘欣欣,顾圣平,赵一梦,等.修正损失率的溃坝洪水经济损失评估方法研究[J].水利经济,2016,34(3):36-40.
- [ 83 ] 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.
- [ 84 ] 张莹.基于能值足迹法的溃坝环境、生态损失评价[D].南京:南京水利科学研究所,2010.
- [ 85 ] 程莉,周晶.基于模糊数学理论的溃坝环境影响分析[J].价值工程,2013(15):290-292.
- [ 86 ] 周克发,李雷.基于社会经济发发展的溃坝洪水损失动态预测评价模型[J].长江流域资源与环境,2008,17(S1):145-148.
- [ 87 ] 赵利,李昕,罗显枫,等.溃坝后果的灰色模糊综合评判研究[J].人民黄河,2010,32(1):113-115.
- [ 88 ] 程翠云,钱新,盛金保.基于属性综合评价模型的水库溃坝后果评价[J].中国农村水利水电,2010(11):101-103.
- [ 89 ] 李东旭.基于随机模拟的溃坝后果多层次模糊综合评价[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [ 90 ] 邹强,周建中,杨小玲,等.属性区间识别模型在溃坝后果综合评价中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(2):45-50.
- [ 91 ] 薛文,熊守纯,陶硕.模糊层次分析法在溃坝后果评价中的应用研究[J].东北水利水电,2015,33(7):52-54.

## Review on service risk analysis of dam engineering

GU Chongshi<sup>1, 2</sup>, SU Huaizhi<sup>1, 2</sup>, LIU Hezhi<sup>2, 3</sup>

(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. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** With the rapid development of dam construction and the continuous improvement of the productivity level, China's dam safety management is transmitting from the traditional engineering safety management to the risk management nowadays. Based on the analysis of the current situation of dam risk analysis and management in China, the research status of dam risk criteria establishment, risk identification, risk assessment and risk treatment was discussed in this paper. In order to perfect the dam risk analysis and management system in China, it should be highlighted in the future to study the dams risk criteria, social and environmental impact caused by dam-break, quantitative model of dam risk identification, dam risk calculation under multiple failure modes, non-probabilistic and time-dependent reliability analysis methods, and the risk analysis methods for dam group system and so on, which may help to ensure the long-term performance of hydraulic structures.

**Keywords:** dam; service risk; criterion; identification; assessment; treatment

(责任编辑:王冰伟)