

# 土石坝长效服役与风险管理研究进展

向 衍<sup>1,2</sup>, 盛金保<sup>1,3</sup>, 刘成栋<sup>1,2</sup>, 方致远<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 程正飞<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 基于对我国土石坝工程建设与安全现状的阐述, 从土石坝内部侵蚀机理、土石坝隐患排查监测检测与诊断技术、防渗系统服役性能、风险分析与退役拆除等方面, 论述土石坝长效服役与风险评估理论、方法及其技术的研究现状。认为今后应从深水环境下大坝的缺陷探测以及隐患快速探测技术、土石坝长效服役性能的多源信息融合推理技术、水库大坝退役决策技术、土石坝溃决影响区次生衍生事件演化机制等方面进行深入研究, 并形成成熟的土石坝工程全生命周期的安全保障与风险防控体系, 以建立健全土石坝工程长效服役保障与提升的理论与方法体系。

**关键词:** 土石坝; 长效服役; 风险管理; 隐患探测; 退役评估

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2018)05-0086-09

**Research progress in long-term service and risk assessment of earth-rockfill dams**//XIANG Yan<sup>1,2</sup>, SHENG Jinbao<sup>1,3</sup>, LIU Chengdong<sup>1,2</sup>, FANG Zhiyuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, CHENG Zhengfei<sup>2</sup> (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China*; 3. *Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China*)

**Abstract:** Based on the current state of construction and safety of earth-rockfill dams in China, in this paper, the theories, methods and technology of long term service and risk assessment of earth-rockfill dams are discussed from the aspects of internal erosion mechanisms, monitoring and diagnosis technology of hidden defects, service performance of the seepage control system, risk analysis and decommissioning demolition. It is concluded that in the future, further study should be focused on the defect detection of dams under deep water environment, the rapid detection technology of hidden danger, multi-source information fusion inference technology of long service state for earth-rockfill dams, the decision-making technology of dam decommissioning and the evolution mechanism of secondary derivative events in the impact zone of dam break. A mature earth-rockfill dam safety and risk control system in the project full life cycle should be developed to establish systematic theories and methods of protection and promotion for long-term service performance of earth-rockfill dams.

**Key words:** earth-rockfill dam; long-term service; risk management; hidden danger detection; decommissioning assessment

## 1 土石坝工程建设与安全现状

随着我国水利水电建设的大力推进, 一批建设环境苛刻、运行条件复杂且坝高超过 200 m 的高土石坝工程在建或将建, 它们的长效服役性能与安全稳定事关国家经济社会稳定与发展。

土石坝是土坝、堆石坝和土石混合坝的总称, 是人类最早建造的坝型, 具有悠久的发展历史<sup>[1]</sup>。其建设历程可分为古代土石坝阶段(19 世纪中叶以前)、近代土石坝阶段(19 世纪中叶至 20 世纪 30 年代)及现代土石坝阶段(20 世纪 30 年代后, 坝高过

百米的高土石坝首次出现)3 个阶段。20 世纪 50 年代末高土石坝在高坝数量中仅占 31%, 60 年代末碾压施工技术广泛应用推动了高土石坝建设, 70 年代末土石坝数量与高度均超过混凝土坝。土石坝工程已成为世界坝工建设中发展最快的坝型, 土石坝和面板堆石坝工程建设历程简况如图 1 所示。根据《2016 年全国水利发展统计公报》(2017)<sup>[2]</sup>, 我国已建成各类水库 98 460 座, 其中 95% 以上为土石坝, 95% 以上是 20 世纪 80 年代以前建设的老坝。我国高土石坝建设虽起步晚, 但发展较快, 已建最高土石坝为糯扎渡心墙堆石坝(坝高 261.5 m), 在建最高土

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401603); 国家自然科学基金(51679151); 水利部公益性行业科研专项(201501033)

作者简介: 向衍(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事大坝安全评价与病险诊断研究。E-mail: xyxiang@nhri.cn

石坝为双江口心墙堆石坝(坝高 314 m)。同时我国也是世界上拥有 200 m 级以上高坝最多的国家<sup>[3]</sup>。

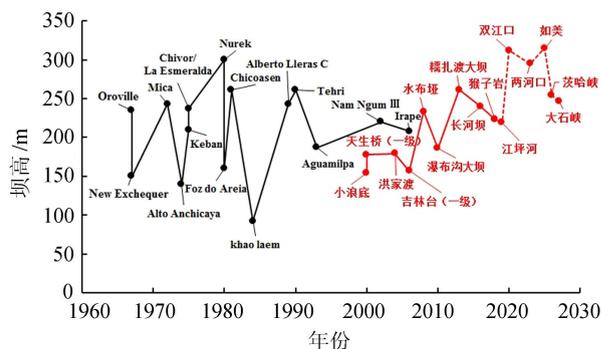


图1 土石坝建设历程(1960—2030年)

水库大坝工程对社会稳定和国家安全意义重大,我国水库大坝安全状况总体良好,但仍存在先天不足、管理薄弱、工程老化、应对突发事件保障能力薄弱等突出问题<sup>[4]</sup>。主要安全隐患有:①防洪安全隐患,包括防洪标准不足,泄洪设施泄洪能力不足,下游泄洪通道行洪能力不足;②渗流安全隐患<sup>[5]</sup>,包括集中渗漏侵蚀<sup>[6]</sup>、逆向侵蚀<sup>[7]</sup>、潜蚀<sup>[8]</sup>顶蚀、饱和失效,此外,植物根系、动物的通道和居穴、排水设施和管道的老化也会加剧土石坝的内部侵蚀;③结构安全隐患,包括坝体滑坡、泄、输水建筑物结构异常变形,白蚁及其他动物危害;④抗震安全隐患;⑤金属结构安全隐患;⑥运行管理安全隐患;⑦其他安全隐患。

土石坝长效服役与风险管理研究是一个多学科交叉和多研究手段综合的复杂课题,涉及侵蚀机理、大坝隐患排查、防渗系统性能演化及风险评估等问题。其中,土石坝内部侵蚀机理研究是保障土石坝长效服役与安全运行的基础,土石坝隐患排查与防渗系统控制分别从运行维护与安全控制为土石坝长效服役提供技术支持,而风险评估则有助于降低大坝风险,延长大坝服役寿命。

## 2 土石坝隐患病害监测、检测与诊断

土石坝失事前通常存在各种不同警兆险情,若隐患未被及时发现或处理,有可能演化为重大工程险情,从而危及土石坝运行安全。因此,采用有效的监测、检测与诊断技术及时发现隐患病害尤为重要。

### 2.1 土石坝隐患病害监测与检测技术

#### 2.1.1 安全监测技术

安全监测技术是指通过布设监测仪器对大坝渗流、变形、应力应变、水文气象、地震反应及水力参数等进行监测,以实现定期或实时获取土石坝安全状态信息,完整的大坝安全监测系统包括安全监测数据采集装置、数据自动采集系统和自动化分析评价系统三部分。

我国土石坝安全监测大致可分为4个发展阶段,第1阶段为20世纪80年代前,大量水库大坝建成,但管理粗放,主要依靠表观巡视检查、人工观测记录分析为主,这一阶段溃坝事故频发;第2阶段为20世纪八九十年代,大坝安全监测逐步实施,自动化监测起步,实现了数据自动采集及其基本应用,管理水平得以提升;第3阶段为21世纪初,智能化开始应用,大坝安全信息感知、存储、分析应用能力显著提升,溃坝概率大幅降低;第4阶段为21世纪以来,面对水库突发事件应急保障能力不足等挑战,亟待利用现代信息技术手段,透彻感知、自我学习、精准预知、决策支持,切实保障大坝安全。在此背景下,智能诊断、数字大坝、智慧管理等理念和需求应运而生并逐步应用,其融合互联网并借助信息采集技术及数值仿真模拟技术指导设计、施工与管理。近年来兴建的许多高坝大库均采用该理念与方法,典型工程如糯扎渡土石坝从设计到管理都创新性地应用了数字大坝管理系统,为国内首创。

在数字大坝实践过程中,迫切需要基于“互联网+”平台更科学、更高效的智能管理体系对采集的海量数据进行有效的深度分析,由此推动数字大坝到智慧大坝发展。智慧大坝是以数字大坝为基础框架,以物联网、智能技术、云计算与大数据等新一代信息技术为基本手段,建立动态精细化的可感知、可分析、可控制的智能化大坝建设与运行管理体系;其次,该体系具有整体性、协同性、融合可拓展性、自主性和鲁棒性的特点<sup>[9,10]</sup>。虽然智慧大坝运用前景广阔,但由于实践经验较少,故需注重信息技术与空间虚拟技术、大坝信息精准感知技术、大数据快速传输与存储技术、虚-实调控模型仿真模拟、智能快速决策与反馈系统、智慧大坝工程建设管理模式等研究。

#### 2.1.2 运行期健康检测技术

除常规采用的坑探、槽探、井探、钻探等地质勘探手段获取坝体与基础物理力学参数外,坝工界研发了诸多无损检(监)测技术与装备对运行期大坝进行健康检测,典型的如工程地球物理诊断技术,通过声波、电磁波、电场、磁场等物理场携带的被检对象信息,以判断被检对象内部结构或隐患病害等。

a. 高密度电阻率法。该技术主要基于土石坝坝体与坝基介质间的导电性差异,根据实测的视电阻率剖面进行计算、处理、分析,即可获取土体电阻率分布,检测前采用所有电极一次性完成阵列布设,其优点是采集数据点密度高、数据量大且采集速度快,可真实探测土石坝工程中洞穴、裂隙、松散层、沙层和渗漏通道等隐患的规模、位置与埋深等,已在诸多土石坝工程中得到广泛应用<sup>[11-13]</sup>,图2为我国西

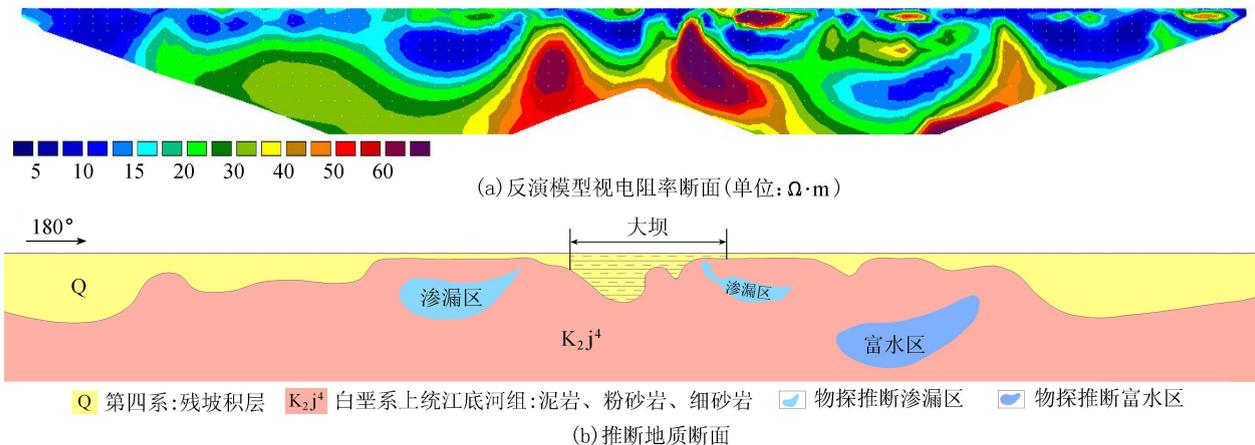


图2 大坝典型断面高密度电法原始异常及反演结果

南某水库渗漏通道检测成果,揭示了某土石坝两坝肩中存在的渗漏异常。

**b. 电磁阵列剖面法。**电磁阵列剖面法根据预期的探测深度选取一个或几个固定的频率,沿大坝剖面同步测量电场与磁场,并求出其比值。该方法可消除常见的因地表不均匀等产生的电阻率畸变现象,并能较真实有效地反映大坝坝体坝基内的材料变化情况,以此对渗漏通道以及渗漏出口进行有效探测。该方法已得到广泛应用<sup>[14-15]</sup>。

**c. 声呐渗漏检测技术。**声呐渗流探测技术<sup>[16]</sup>利用震电理论与声波在水中的优异传播特性,实现对水流速度场的测量。若被测水体存在渗流,则将在测点产生渗流场,声呐探测器阵列可精细地测量出声波在流体中能量传递的规律。并依据所得数据的时空分布显示出渗漏声源的发出方向。该技术现已在多座土石坝工程中得到广泛应用,如白云水电站混凝土面板堆石坝渗漏检测等。

**d. 探地雷达示踪法 (ground-penetrating radar method)。**探地雷达示踪法可检测裂缝深度和渗透速度:将示踪剂注入坝体裂缝中,采用探地雷达技术综合监测示踪剂在裂缝中的流动状态,检测裂缝的发育深度。示踪剂为对雷达波具有强烈反射性能的液体,其对雷达波的反应与其周围介质相比具有数量级的差异。在重力或者灌入压力的作用下,示踪剂向裂缝底部流动,待示踪剂到达裂缝底部时,采用雷达对裂缝部位进行扫描检测。积存在裂缝底部的示踪剂在雷达扫描影像上有明显的显示,由此可确定裂缝底部的位置,从而得出裂缝深度<sup>[17]</sup>。如我国某大型水库防浪墙底部裂缝与脱空检测(图3)。

## 2.2 土石坝隐患病害诊断模型与方法

通过巡视检查、原位监测以及现场检测可获得土石坝隐患病害的基本信息与数据,并借助相应的工程经验、监控模型、数值分析等方法以实现对土石坝隐患病害的诊断。其中基于工程经验以及原位监

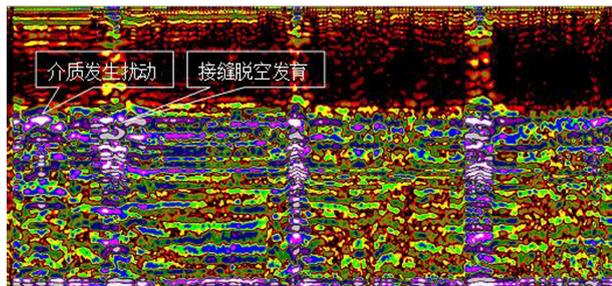


图3 防浪墙底部脱空检测示意图

测的诊断方法较为常用的有倾度法和监控模型诊断方法。前者主要用于土石坝中隐蔽裂缝的探查,结合观测资料通过对短距离内两点间土坝相对变位(土石坝中一般以沉降为主)进行估算,以判定坝体内隐蔽裂缝的发生。该方法依赖于较为翔实的沉降监测资料,而在工程设计阶段难以得到推广应用。为此,彭翀等<sup>[18]</sup>基于有限元理论技术,提出了变形倾度有限元法,并在糯扎渡心墙堆石坝工程中得到应用。监控模型诊断方法与上述不同,其基于大坝实测资料分析成果,运用数学模型对大坝的工作形态以及安全性态的发展进行表征与诊断以为决策者提供决策支持<sup>[19]</sup>。目前国内外土石坝安全监控理论主要围绕监测资料的合理性分析与模型研究、反分析问题以及安全决策支持系统开发等。

### 2.2.1 土石坝安全监测资料的合理性分析与模型研究

目前主要是基于最小二乘法理论进行数据的粗差处理,常用的方法有数据探测法与稳健估计法。许多学者在此有相应的研究,如 Kalman<sup>[20]</sup>提出的卡尔曼滤波方法。在对工程数据进行处理时,多因素监测信息中常常会出现一个或多个严重偏离目标真值的数据(通常称为野值),为此基于统计学理论对土石坝安全监测资料合理性分析总结了两个发展方向,一是基于数理统计的残差分析,二是基于概率的随机模糊诊断技术研究。许多学者基于相关数学

理论提出了相应的模型如灰色理论模型<sup>[21]</sup>、模糊数学理论模型<sup>[22]</sup>、各类改良的人工神经网络理论模型<sup>[23]</sup>、基于多源信息融合的模型<sup>[24]</sup>等,都对监测数据的合理性分析、处理、预报等作出了相应贡献。

### 2.2.2 基于安全监测资料的土石坝结构性态反分析

土石坝计算的反馈分析主要包括对土体本构模型关系的模拟计算,近年来在该方面研究工作较多,主要围绕算法的优化、模型的优化等<sup>[25-27]</sup>。其中,在反分析问题中,采用优化算法(主要为仿生算法,如神经网络、萤火虫算法、蚁群算法、遗传算法等)对土石坝渗透系数以及其他相关的物理力学参数进行反演计算。优化模型是基于原型观测资料,利用数学模型对其中的参数变量进行求解,该模型研究主要围绕线性与非线性模型开展。对于土石坝反分析而言,主要考虑土层和荷载较简单的情况,多采用线弹性模型,当土层较多时,则采用非线性模型,目前只能结合计算模型和经验针对具体问题开展且存在较多局限性。

### 2.2.3 土石坝安全决策支持系统

土石坝安全决策支持系统可为管理部门决策大坝安全状态提供相关建议。随着计算机科学技术的发展,该系统也得到飞速发展。国内较早开发了 DAMS 大坝自动监测系统<sup>[20]</sup>,后又研发了 DSAMS 大坝安全监控管理系统<sup>[21]</sup>,国外由意大利与法国开发了大坝安全监控数据处理系统等。由此可知,土石坝安全决策支持系统从最初的信息管理系统已然向专家系统发展。随着物联网、云计算、大数据等现代信息技术的发展,亟待全面感知水库大坝多源信息。通过数据融合,实现大坝安全智能诊断与智慧管理,为充分发挥水利基础设施整体效能、进一步提升水库大坝应急管理能力、切实保障大坝安全运行提供科技支撑。发展大数据驱动的大坝健康诊断与除险决策、预测预警与优化调度、风险评估与应急管理一体化的智慧管理决策系统是热点研究方向。

## 3 土石坝防渗系统长效服役性能研究

渗透破坏是土石坝发生溃坝的主要原因,研究土石坝防渗系统材料性能演化规律,针对演化规律采用有效的对策进行控制,对于土石坝安全运行具有重要意义。归纳起来,土石坝防渗系统主要有防渗帷幕、混凝土防渗墙、钢筋混凝土面板和土工膜等。

### 3.1 防渗帷幕长效服役性能研究

#### 3.1.1 老化机理

防渗帷幕老化主要由于机械力侵蚀和化学溶蚀作用,影响帷幕效果及耐久性的主要因素包括施工质量引起的帷幕密实性、特殊地层及地下水对帷幕

的危害等。坝址环境水与土工建筑物相互作用广泛存在于坝址区,地下水侵蚀或溶蚀引起幕体防渗效果降低,呈弱酸性的地下水或富含侵蚀  $\text{CO}_2$  的弱酸性水对帷幕结石体的侵蚀导致  $\text{CaO}$  流失,是引起帷幕防渗能力衰减的主因。库坝运行后水环境变化致使库水中有有机质富集,可导致下层库水和坝基地下水的侵蚀性加强,从而造成帷幕防渗材料性能衰减。实践中常发现大坝坝址区伴随着渗水出现胶状析出物。此类物质多数源于帷幕体后,因而可通过对析出物的分析,判断帷幕状况,分析帷幕老化机理<sup>[22]</sup>。

#### 3.1.2 长效服役性能评估的水化学图示法

水化学图示法是水文地球化学研究的重要手段,可直观地表现水化学组成、水质特征等,因此得到广泛应用。水化学图示法可与聚类分析、因子分析等统计方法相结合研究水质特征,也可与地质条件等相结合研究水—岩相互作用等水化学过程<sup>[23]</sup>,同时还可用于不同区域水质时空演变分析。评价帷幕体防渗性能首先需了解水质指标分布情况及特征,从而判断坝基帷幕体局部是否存在“疑似异常点”。通过对异常点的空间分析,可反映帷幕后径流条件差异,并对相关指标做时间序列分析,如 pH 值、TDS 等综合指标,以及反映该位置某些重要水化学指标等,还可通过散点图比较水质指标间的相关关系。通过上述水化学图示方法,可从水质角度对坝基帷幕体防渗性能做出初步诊断,并结合其他分析项目(如渗流监测资料)做出更进一步判断。

### 3.2 混凝土防渗墙长效服役性能研究

土石坝中混凝土防渗墙按部位可分为坝体和坝基两种形式,影响其服役性能的因素众多,通过分析各因素影响,可针对性地提出改性措施提高其长效服役性能。

#### 3.2.1 服役性能影响因素

已有案例与工程经验分析表明,混凝土防渗墙体防渗材料弹性模量、强度、抗渗性、施工质量、耐抗性、墙体周边条件、墙身及墙厚等几何尺寸是影响混凝土防渗墙在土石坝工程适应性的主要因素。如由于混凝土防渗墙墙体材料弹性模量与周围土体的变形模量差异巨大,致使墙体易出现裂缝,防渗作用降低,严重时会使防渗遭到破坏。对成墙质量起决定作用的主要是造孔成槽和浇筑成墙。为提高低弹模防渗墙的适应性,必须严格控制施工质量。为提高防渗墙耐久性,一方面应控制防渗墙渗透系数,另一方面可适当增加水泥用量,设法增加混凝土密实度,提高抗渗性和耐久性。

#### 3.2.2 防渗墙改性措施

研究表明,降低墙体弹性模量对降低墙体内力

十分有效。为降低墙体弹性模量,在混凝土中加入粉土或黏土,浇筑时不易堵管,因而被广泛利用。人们在实践中用黏土和(或)膨润土取代普通混凝土中的大部分水泥形成了一种柔性墙体材料,这种混凝土的强度和弹性模量都很低,能适应地基变形,有效地避免墙体破坏,且抗渗性能很好,即被广泛利用的塑性混凝土。工程中为改善墙体变形协调能力,需掺入少量粉煤灰和添加剂,在基本不改变普通混凝土其他性能的前提下,尽可能降低混凝土弹性模量,施工前必须做多组材料配合比试验。实践证明若要大幅度地降低混凝土弹模,则需以降低强度指标为代价。

### 3.3 钢筋混凝土面板长效服役性能研究

#### 3.3.1 钢筋混凝土面板材料的特性

对承受很高的水力比降的面板,混凝土的耐久性和抗渗性比其强度更重要。为增加抗渗性能,需加入引气剂,它不仅能改善混凝土拌合物性能,节约水泥,还可提高混凝土强度、抗渗性、抗冲磨、抗气蚀和抗冻性,也能有效地控制碱骨料反应,提高耐久性。目前国内均采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥来拌制面板混凝土。实践表明,使用减水剂时要认真进行研究,可使用一些本身不发泡的减水剂,与引气剂复合作用。为提高混凝土均匀性,保证具有较高的柔性和轴心抗拉强度,坝体均采用二级配混凝土,限制骨料最大粒径不大于 40 mm。面板混凝土的抗渗性要求,通常是根据作用水头和耐久性要求来决定。混凝土冻融循环产生的破坏作用主要有冻胀开裂和表面剥蚀两个方面,使混凝土弹性模量、抗压强度、抗拉强度等力学性能严重下降。为提高混凝土耐久性,需综合提高混凝土的抗冻性、抗渗性和抗裂性。此外,在非严寒地区,只要水工混凝土的温度在零度以下,其孔隙中水分就会冷冻膨胀而使混凝土疏松,故水位变动区及其以上的混凝土都应提出抗冻性要求。

#### 3.3.2 长效服役性能演化规律

混凝土作为面板堆石坝防渗体系最主要的筑坝材料,其材料性能的劣化是导致面板堆石坝服役性能降低的内在因素。影响混凝土材料性能演化的因素很多,如冻融破坏、碳化、硫酸盐侵蚀、碱集料反应和力学破坏等。目前还没有能够完全揭示冻融破坏内部破坏机理的理论,普遍接受的有静水压理论和渗透压理论。目前在碳化机理较为明晰的情况下,国内外学者在碳化深度预测和影响因素等方面进行了较多的研究。实际工程中可以通过合理设计混凝土材料、提高混凝土密实度以及设置保护层等措施提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。碱集料反应是指混

凝土中的碱性物质与集料中的活性成分之间发生化学反应,生成物吸水膨胀从而导致混凝土开裂的复杂过程。实际工程中可以采用限制混凝土含碱量、合理选用集料、掺入引气剂等措施预防和抑制碱集料反应。水工混凝土材料性能的演化是多种力学因素和环境因素耦合作用的结果。这些力学因素和环境因素并非简单叠加在一起,各因素之间会相互影响,若只考虑单一因素来研究水工混凝土材料性能演化规律显然不符合实际情况。目前,多因素耦合作用的研究相对较少,部分学者开展了此方面的研究工作,比如 Nguyen 等<sup>[24]</sup>通过试验研究了钙离子析出和力学破坏作用下混凝土材料性能的变化规律,并建立了化学-力学耦合模型;于琦等<sup>[25]</sup>基于 Papadakis 碳化模型和数值分析技术,研究了冻融环境对混凝土碳化的影响,建立了碳化深度预测模型。

### 3.4 土工膜长效服役性能研究

近年来,土工膜作为新型的防渗材料,具有防渗性能高、适应变形能力强、施工便捷、价格低廉等优点,并且随着土工膜防渗技术的不断发展,土工膜在水库大坝工程中受到了广泛青睐。据 ICOLD(国际大坝委员会)2010 年不完全统计,世界上采用土工膜防渗的大型土石坝共有 176 座<sup>[26]</sup>。

#### 3.4.1 土石坝中土工膜的结构特性

a. 土工膜布置在上游坝面,并设置混凝土护坡保护,结构形式与混凝土面板堆石坝相似,该种布置形式较为普遍,90% 的土工膜防渗工程均采用该种布置形式。

b. 土工膜裸露布置在上游坝面,仅在土工膜表面涂设沥青等材料制成保护层。这种布置形式主要在国外应用较多,如法国 Banegon 坝,国内土石坝中尚未采用。

c. 将土工膜设于坝体内部作为防渗心墙,为保证土工膜能够适应坝体变形,一般在施工时采用“之”字形铺设方法,并与坝体填筑协同进行,目前国内外采用较少。

d. 对于透水性较强的库盘,常采用土工膜进行全库盘防渗,并在土工膜上下分别设置保护层和垫层。这种防渗形式可以有效解决库区渗漏问题,因此在多数水库以及大型渠道中得到了广泛运用。

#### 3.4.2 土工膜缺陷对服役性能的影响

对于土工膜缺陷问题,早在其应用之初便引起了广泛的关注。但由于缺陷问题的复杂性和当时技术水平的限制,直到 20 世纪 80 年代,国内外学者才陆续开展了相关的研究。国外专家与学者对土工膜与垫层间的接触渗流、缺陷渗流的影响因素等进行了深入研究,并取得了较大突破,但在土工膜缺陷渗

漏对土石坝渗流影响方面,缺乏系统的研究。从 20 世纪 90 年代开始,我国开展了多项土工膜缺陷渗漏研究,并取得了丰富的研究成果。但在土工膜缺陷渗漏方面聚焦于缺陷渗漏的数值模拟方法、缺陷相关因素以及小尺寸(5 cm 以下)缺陷对土石坝渗流影响,在大尺寸(5 cm 以上)缺陷渗漏影响方面,尚未有系统研究。土工膜作为土石坝防渗体,其缺陷成因复杂,且与传统防渗体差别较大,仅由实测性态无法全面判别土工膜的防渗安全性,比如土工膜老化对防渗安全性的影响,无法通过观测资料准确反映。

## 4 土石坝工程风险管理和退役拆除

水库大坝具有很长的生命周期,从勘测设计、工程建设、运行管理到降等报废,面临着对自然对象认知不足的风险、工程建设质量隐患的风险、运行期应对地震以及极端气候事件等自然灾害的风险、工程调度中人为失误的风险等。与此同时,土石坝工程在蓄水发挥效益的同时,也对下游构成潜在风险。大坝风险管理则是以降低大坝风险为目标,按风险是否可以接受来决策是否需要大坝进行除险加固。水库大坝风险是对水库大坝存在的安全隐患对生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性的度量。风险管理包括风险分析、风险评价、风险评估、风险处理以及风险标准等系列关键技术问题<sup>[27]</sup>。

### 4.1 风险评估

20 世纪 60 年代末,由于数起严重溃坝事件美国等发达国家率先对大坝开展了风险分析研究。1982 年美国陆军工程师团采取相对风险指数来衡量大坝风险。1991 年加拿大 Hydro 第一次将概率计算用于大坝风险评价。1994 年澳大利亚编制了《大坝风险评价指南》,奠定了大坝风险评价的基础概念。1998 年美国国家气象局研究了溃坝风险模型。1999 年加拿大大坝安全协会(CDA)发布了《大坝安全导则》,提出了大坝安全的具体含义。2000 年澳大利亚大坝安全委员会编制了《大坝溃决后果评价指南》,为大坝风险评价提供了基本概念。2001 年葡萄牙工程师综合考虑了 20 多个大坝风险因素情况下划分大坝风险级别。2003 年美国垦务局公布了大坝风险分析技术指南,给出了较完善的大坝风险分析评价方法。2010 年国际大坝委员会(ICOLD)公布了关于大坝风险管理的公报,系统描述了大坝风险管理目标、计划、实施、监控及评价校核方法与相关步骤。国内大坝风险分析技术起步较晚,系统研究始于第 20 届国际大坝会议“风险分析”专题中关于风险分析在大坝安全决策和管理中的应用研讨,近年来取得了较大进展。目前已形成

了大坝破坏概率、溃坝模式、溃坝对下游的影响评价等体系,以及大坝风险标准及风险管理模式进行了系统研究。

水库大坝风险以溃坝的可能性(概率)和产生的后果的乘积表示<sup>[28]</sup>。为此首先需识别大坝的风险要素,一般采用破坏模式分析确定溃坝模式和溃坝路径,分析方法有 FEMA 法(failure models and effects analysis)<sup>[29]</sup>和 FMECA 法(failure models, effects and criticality analysis)<sup>[30]</sup>。根据已有溃坝资料与前述土石坝主要安全隐患分析,土石坝主要有 5 类溃坝模式和 24 种可能的溃坝路径<sup>[31]</sup>。溃坝概率计算分为半定量和定量分析法,其中半定量分析法可采用事件树法,定量分析法采用可靠度法。

随着对风险认识 and 对其研究不断深入,欧洲委员会(EU)采用 RAPID-N 工具<sup>[32]</sup>对技术灾害事件风险进行评估(如地震灾害),正在开展对洪水风险分析的工作。Cruz 等<sup>[33]</sup>提出对于城市地区技术引发的灾害事件风险初步评价的定性方法——PANR。该方法包括识别、量化和分析一个地区受自然灾害的地方暴露在此地区的有害物质的存在所带来的风险。PANR 将风险定义为一个危险函数(幅度和概率)和脆弱性因素暴露(后果、严重程度和概率)的危害(包括自然和次生灾害事故及其多米诺效应)。德国的安装安全技术规程(TRAS)中也考虑了技术引发的灾害事件,如 TRAS 310 考虑了洪水和降水引发的危害,TRAS 320 考虑了风、雪荷载和冰载荷的危害,但未给出定量的评估模型。

已有研究和风险评估工具表明,溃坝影响及其后果是大坝风险分析的重要组成部分。溃坝及其影响分析是指确定溃坝影响范围、评价溃坝后果的基础性工作。溃坝后果包括生命损失、经济损失及社会与环境的影响。生命损失受风险人口总数与分布、溃坝发生时间、警报时间、水深和流速、洪水上涨速率和撤离条件等因素的影响,常用的计算方法有 Dekay & McClelland 方法、Graham 方法<sup>[34]</sup>。

溃坝经济损失包括直接经济损失和间接经济损失。间接经济损失一般根据具体情况采用直接估算法和系数法进行计算,缺乏深入系统研究。社会环境影响风险标准难以确定,一般采用 F-N 线法初步确定。一旦溃坝洪水引发的次生灾害,如对下游工矿企业的设备设施产生了影响,这些厂房往往储有大量原油、汽油或其他类型的易燃液体碳氢化合物等危险物质,如卡特里娜飓风和丽塔飓风后近海石油和天然气设施的释放和紧急反应<sup>[35]</sup>,随着危险物质的释放,可能造成更严重生命、经济、社会环境损失<sup>[36]</sup>,加上安全屏障和系统随之受到损害,技术

灾害事件发生多米诺骨牌或级联灾害的可能性也高于常规事故<sup>[37-38]</sup>。由此可见,此类事故的程度和后果往往是灾害次生衍生反应的主要部分。此外,水库大坝工程溃决引发的次生衍生风险目前仍被视为一种新兴的风险,仅仅在最近几次重大事故后才得到关注,导致的后果即为目前仍缺乏关于次生衍生事件演化机制的系统研究。

#### 4.2 土石坝工程退役拆除

面对我国土石坝数量多、病险多、功能萎缩和大坝超设计寿命的严峻现实,在注重工程措施的同时,对技术上不可行、经济上不合理、生态环境负面影响大的土石坝实行降等或拆除,是消除安全隐患、发挥相应效益的一种安全管理措施<sup>[39-40]</sup>。退役是水库大坝生命周期的重要阶段,是在我国水库大坝病险老化、功能丧失、经济效益衰退以及生态系统退化的背景下的必然趋势<sup>[40]</sup>。大坝工程退役的原因主要包括环境保护、工程安全和工程效益3方面<sup>[40]</sup>。若要实施大坝退役,应首先进行退役评判决策。我国对大坝退役决策的研究较少。彭辉等<sup>[41]</sup>制定了病坝拆除决策流程图,参考国外研究成果建立了策模型的评价指标体系。杨孟<sup>[42]</sup>选择多准则决策中的网络分析法,构建了水库大坝退役决策的收益成本风险模型。国外水库大坝退役决策相关研究较丰富。Heinze<sup>[43]</sup>提出了水库大坝退役决策基本框架,着重对拆坝可能造成的物理、生态及社会经济影响评估进行阐述。American Rivers<sup>[44]</sup>组织编写的退役坝拆除决策指南概述了拆坝可能带来的社会、经济、生态成本和收益。认为能够满足成本收益均衡这一要求的方案因地制宜,不存在普适性公式。Brown<sup>[45]</sup>构建了综合性的大坝评估模拟工具,以收益最大化、成本最小化作为决策目标,从社会经济、生物物理和地理政治三个维度模拟大坝建设和退役拆除的成本和收益。Corsair<sup>[46]</sup>建议基于规范的决策分析方法,使用多准则决策清晰地展现决策过程中相互矛盾的目标,便于决策过程中多目标权衡。ASCE编制的《大坝及水电设施退役指南》<sup>[47]</sup>主要通过成本收益分析进行大坝退役决策,对备选方案收益及成本进行经济分析,确定方案经济可行性。经济分析包括确定受备选方案影响的工程用途及其价值,以及相应收益和成本比较。

综上,随着水库大坝老化、公众风险和生态环境意识增强,水库大坝退役需求越来越大,而我国相关工作进展缓慢,主要存在如下问题:①水库大坝服役状态评估理论包括驱动力因素、耐久性模型、衰变过程理论、寿命评估方法等,均需引入时间参数影响,且与退役有关的时变效应应区分“缓变”和“骤

变”特征;②缺乏系统、完整的退役决策方法,目前国内外研究一般仅从结构安全或结构风险方面进行,需综合考虑成本-效益-风险三元驱动的退役评估决策方法;③水库大坝可能仍发挥着抵御洪水功能,退役可能导致其下游洪水风险增加,科学决策需对退役方案可能引起的洪水增量风险变化进行全面评估,包括降低溃坝风险的正作用,以及防洪容消消失导致雨洪风险增加的负作用;④经济社会发展使得以生态恢复为目的退役需求增加,必然加剧社会需水与生态需水矛盾,生态系统服务价值特别是非市场商品价值评估是成本收益评估的难点,目前研究缺乏系统的生态系统服务价值评估理论与方法。

#### 5 发展趋势与亟待解决的问题

a. 仍有土石坝工程出险甚至破坏失事,渗流是影响安全的关键因素之一,需研发更加有效的隐患探测、突发事件监测预警、应急抢险等技术、材料和装备,建立科学高效的安全保障与风险防控体系。

b. 我国高坝大库建设正处于世界前列,高坝大库在蓄水初期或经过若干年运行后,可能出现渗漏、坝体裂缝、接缝止水失效的病害,对工程安全产生重大威胁。常规检测中部分水库放空难度较大或不具备放空条件,因此开展深水环境下大坝缺陷探测及隐患快速探测技术是研究重点。

c. 土石坝长效服役性态的多源信息融合推理技术研究有助于实现大数据环境下的安全诊断与智慧管理,可为保障高土石坝运行安全提供技术决策支持,有重要的研究价值。

d. 为快速、准确地评估土石坝工程风险,应结合其特点尽快建立风险标准并深入开展实用评估技术研究;为降低风险,应高度重视非工程措施,并与工程措施结合使用;为确定合理的服役寿命,应建立土石坝退役评估体系。

e. 由于土石坝结构、服役环境与运行工况复杂,导致灾害事件本身并非独立个体,其发生发展演化中常会从单一原生灾害事件逐渐演变成次生衍生灾害事件,自然、社会、人为因素以不同形式作用其中。溃坝引发的突发事件作用形式和内容不断变化,造成后果和伤害持续蔓延、扩大,呈现出典型渗透、干涉、转化、分解、合成、耦合等特征,加之自然环境变迁和人类社会发展,各类灾害对下游影响区内危险设施构成重大威胁,多数情况下相关风险被严重低估,故需建立相适应的风险评估方法与工具。

#### 6 结 语

本文就一些典型的研究热点进行论述,并对当

前研究现状进行讨论与展望。认为为保障土石坝健康安全的长期服役,有必要对其长效服役性能与风险评估进行研究。土石坝长效服役与风险评估研究是一个多学科交叉融合的复杂课题,其涉及多方面的研究。高坝尤其是高土石坝的服役性能稳定与提升是为今后需加强的研究方向,应当建立健全土石坝长效服役保障与提升的理论与技术集成体系,以使土石坝在全生命周期“健康”运行,实现其社会经济任务,为推动社会经济的发展作出技术贡献。

## 参考文献:

[1] 顾淦臣,束一鸣,沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 中华人民共和国水利部. 全国水利发展统计公报. 2016[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017.

[3] 庞琼,王士军,倪小荣,等. 世界已建高坝大库统计分析[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6):34-37. (PANG Qing, WANG Shijun, NIE Xiaorong, et al. Statistical analysis of world existed high dams and large reservoir[J]. Advances in Science & Technology of Water Resources, 2012, 32(6):34-37. (in Chinese))

[4] 刘成栋,张凯,向衍,等. 土石坝安全隐患应急处理决策支持系统的实现[J]. 人民黄河,2018,40(2):126-130. (LIU Chendong, ZHANG Kai, XIANG Yan, et al. Decision Making System for Seeking and Disposing Hidden Dangers on Earth-Rockfill Dam[J]. Yellow River, 2018, 40(2):126-130. (in Chinese))

[5] 周荣,孙言. 土石坝内部侵蚀的最新研究成果[J]. 水利水电快报,2017,38(1):15-17. (ZHOU Rong, SUN Yan. A new review of internal erosion of earth rock dam[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2017,38(1):15-17. (in Chinese))

[6] PELLIS S, FELL R. Damage and cracking of embankment dams by earthquakes and the implications of internal erosion and piping, UNICIV report No. R-406 [R]. Sydney:The University of New South Wales,2002.

[7] 张强. 基于散粒土孔隙流特性的管涌侵蚀机理试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.

[8] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(3):401-407.

[9] 钟登华,王飞,吴斌平,等. 从数字大坝到智慧大坝[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10):1-13. (ZHONG Denghua, WANG Fei, WU Binping, et al. From digital dam toward smart dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(10):1-13. (in Chinese))

[10] 李庆斌,石杰. 大坝建设 4.0[J]. 水力发电学报,2015, 34(8):1-6. (LI Qingbing, SHI Jie. Dam construction 4.0[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(8):1-6. (in Chinese))

[11] 蔡劲. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. 世界有色

金属,2017(7):101-102. (CAI Jing. Application of high density resistivity method in engineering geophysics[J]. World Nonferrous Metals, 2017(7):101-102. (in Chinese))

[12] 严学春,何帅,沈小庆,等. 高密度电阻率法在贵州东部山区找水中的应用[J]. 工程地球物理学报,2017,14(5):558-564. (YAN Xuechun, HE Suai, SHEN Xiaoqing, et al. Application of high density resistivity method to exploration of water in eastern mountain area of Guizhou[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017,14(5):558-564. (in Chinese))

[13] 孙礼钊,郑琳,包伟力. 高密度电阻率法在某水库南堤渗漏探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2016, 13(5):574-579. (SUN Lizhao, ZHENG Ling, BAO Weili. The application of high-density resistivity method to leakage detection in nan dam of one reservoir[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(5):574-579. (in Chinese))

[14] FEMA. Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion[M]. Washington:ICODS, 2015.

[15] 张欣. 含隐患土石坝坝三维电场特征分析及成像识别技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.

[16] 谭界雄,高大水,王秘学,等. 白云水电站混凝土面板堆石坝渗漏处理技术[J]. 人民长江, 2016, 47(2):62-66. (TAN Jiexiong, GAO Dashui, WANG Mixue, et al. Seepage treatment technology for RCC dam of Baiyun Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2016, 47(2):62-66. (in Chinese))

[17] ANTOINE R, FAUCHARD C, FARGIER Y, et al. Detection of leakage areas in an earth embankment from GPR measurements and permeability logging [J]. International Journal of Geophysics,2015(3):9-19.

[18] 彭翀,张宗亮,张丙印,等. 高土石坝裂缝分析的变形倾度有限元法及其应用[J]. 岩土力学,2013,34(5):1453-1458. (PING Chong, ZHANG Zhongliang, ZHANG Binying, et al. Deformation gradient finite element method for analyzing cracking in high earth-rack dam and its application[J]. Rock & Soil Mechanics, 2013,34(5):1453-1458. (in Chinese))

[19] 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 & Technology of Water Resources, 2015,35(5):1-12. (in Chinese))

[20] 姜晨光,石伟南,巩亮生,等. 大坝变形 GPS 双基站自动监测系统设计与应用[J]. 大坝与安全,2011(3):29-32. (JIANG Chenguang, SHI Weinan, GONG Liangsheng. Design and application of dam deformation automatic monitoring system based on double basis stations GPS technique[J]. Dam & Safety, 2011(3):29-32. (in Chinese))

[21] 王士军. 水库安全监控管理系统框架体系探讨[C]// 全国大坝安全监测技术信息网,中国水力发电工程学

- 会大坝安全监测专业委员会. 全国大坝安全监测技术信息网 2008 年度技术信息交流会暨全国大坝安全监测技术应用和发展研讨会论文集. 北京: 全国大坝安全监测技术信息网, 2008; 327-331.
- [22] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [23] 霍吉祥, 宋汉周, 彭鹏, 等. 水化学图示法及其在坝基帷幕体防渗性能评价中的应用[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 73-79. (HUO Jixiang, SONG Hanzhou, PENG Peng, et al. Hydrochemical graphic method and its application in evaluation of curtain wall seepage resistance of dam foundation [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2011, 30(5): 73-79. (in Chinese))
- [24] NGUYEN V H, COLINA H, TORRENTI J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete; part I experimental results [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(20): 2083-2089.
- [25] 于琦, 牛荻涛, 屈锋. 冻融环境下混凝土碳化深度预测模型[J]. 混凝土, 2012, 20(9): 3-5. (YU Qi, NIU Ditao, QU Feng. Model for predicting carbonation depth of concrete in freezing-thawing circumstance [J]. Concrete, 2012, 20(9): 3-5. (in Chinese))
- [26] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 16-22. (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams [J]. Advances in Science & Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 16-22. (in Chinese))
- [27] 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
- [28] International Commission on Large Dams. ICOLD dam decommissioning guidelines[R]. Paris: ICOLD, 2014
- [29] TENG S, HO S. Failure mode and effects analysis[J]. Computer Knowledge & Technology, 2013, 27(12): 19-26.
- [30] RIPLOVÁ K. Tool of risk management; failure mode and effects analysis and failure modes, effects and criticality analysis [J]. Journal of Information, Control and Management Systems, 2007, 5(3): 100-115.
- [31] 张建云, 杨正华, 蒋金平. 水库大坝病险和溃坝的研究与警示[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [32] GIRGIN S, KRAUSMANN E. RAPID-N: assessing and mapping the risk of natural-hazard impact at industrial installations [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015. Vienna: EGU General Assembly Conference, 2015.
- [33] CRUZ A M, OKADA N. Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities [J]. Natural Hazards, 2008, 44(2): 213-227.
- [34] CRUZ A M, KRAUSMANN E. Hazardous-materials releases from offshore oil and gas facilities and emergency response following Hurricanes Katrina and Rita [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 59-65.
- [35] KRAUSMANN E, CRUZ A M, SALZANO E. Natech risk assessment and management; reducing the risk of natural-hazard impact on hazardous installations [M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [36] PALEO U F. Principles for the evaluation of risk governance and the measurement of performance [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2014.
- [37] 袁宏永. 突发事件及其链式效应理论研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [38] 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.
- [39] 向衍, 盛金保, 杨孟, 等. 水库大坝退役拆除及对生态环境影响研究[J]. 岩土工程学报. 2008(11): 1758-1764. (XIANG Yan, SHENG Jingbao, YANG Meng, et al. Impacts on ecological environment due to dam removal or decommissioning[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(11): 1758-1764. (in Chinese))
- [40] 向衍, 盛金保, 袁辉, 等. 中国水库大坝降等报废现状与退役评估研究[J]. 中国科学: 技术科学. 2015, 45(12): 1304-1310. (XIANG Yan, SHENG Jingbao, YUAN Hui, et al. Research on degrading and decommissioning assessment of reservoir in China [J]. Scientia Sinica, 2015, 45(12): 1304-1310. (in Chinese))
- [41] 彭辉, 刘德富. 病坝识别及其拆除决策步骤研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(9): 101-104. (PENG Hui, LIU Defu. Sick and dangerous dam identification and corresponding decision-making of removal [J]. China Rural Water & Hydropower, 2009(9): 101-104. (in Chinese))
- [42] 杨孟. 水库大坝退役的多准则决策研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [43] HEINZ C. Dam removal: science and decision making [M]. Washington D. C.: Heinz Center for Science, Economics and the Environment, 2002.
- [44] HART David D, JOHNSON Thomas E, BUSHAW-NEWTON Karen L, et al. Dam Removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration [J]. BioScience, 2002, 52(8): 669 - 681.
- [45] BROWN P H, TULLOS D, TILT B, et al. Modeling the costs and benefits of dam construction from a multidisciplinary perspective [J]. Journal of Environmental Management, 2009(3): S303.
- [46] CORSAIR H J, RUCH J B, ZHENG P Q, et al. Multicriteria decision analysis of stream restoration; potential and examples [J]. Group Decision & Negotiation, 2009, 18(4): 387-417.
- [47] Task Committee on Guidelines for Retirement of Dams and Hydroelectric Facilities. Guidelines for retirement of dams and hydroelectric facilities [M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1997.

(收稿日期: 2018-05-16 编辑: 郑孝宇)