

# 中国与瑞士大坝安全监控机制比较及启示

马福恒<sup>1,2</sup>, 胡江<sup>2,3</sup>, 叶伟<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;  
2. 水利部大坝安全中心, 江苏 南京 210029; 3. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:**依据“中瑞大坝安全加固项目”成果, 简要归纳了瑞士的大坝安全法规和安全管理模式, 深入剖析了瑞士的大坝安全监控机制; 总结分析了我国水库大坝的安全管理机制和安全监控体系; 在此基础上, 对比分析了两国水库大坝安全监控机制的异同, 认为瑞士已形成了职责明确、实用高效的大坝安全监控机制, 我国已建立的大坝安全监控机制与瑞士相似, 但安全管理力度不足, 主动监控意识不强, 实际效果相差甚远, 对此, 我国可借鉴瑞士大坝安全监控的成熟模式, 增强主动安全监控意识; 同时, 建立以风险管理理念为基础的安全监控体系, 并引入物联网等先进技术, 提升量多面广小型水库的安全监控水平。

**关键词:** 大坝; 安全管理; 组织体系; 监控机制; 瑞士

**中图分类号:** TV122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2018)05-0032-06

**Comparison and enlightenment of Sino-Swiss dam safety monitoring and controlling mechanisms//** MA Fuheng<sup>1,2</sup>, HU Jiang<sup>2,3</sup>, YE Wei<sup>3</sup> (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Based on the achievements of Sino-Swiss Cooperation Project on Dam Safety Enhancement, the safety regulations and safety management modes of dams in Switzerland were summarized briefly, and the corresponding safety monitoring and controlling mechanisms of the dams were deeply analyzed in this paper. The safety management mechanism and safety monitoring system of the reservoirs and dams in China were also summarized and analyzed. Based on the results, the similarities and differences of the dam safety monitoring mechanisms between the two countries were compared and analyzed. A clear, practical and effective dam safety monitoring mechanism has been formed in Switzerland. The dam safety monitoring mechanism established in China is similar to that in Switzerland, but it is insufficient and the awareness of active monitoring is not strong enough, resulting in a quite different actual result. Therefore, China can learn from the mature modes of dam safety monitoring in Switzerland and enhance the awareness of active safety monitoring. Meanwhile, the safety monitoring system based on the concept of risk management should be set up, and advanced technologies such as the Internet of Things are suggested to be introduced to improve the safety monitoring level for small reservoirs with the characteristics of great numbers and various functions.

**Key words:** dam; safety management; organization system; monitoring and controlling; Switzerland

根据 2010—2012 年水利普查结果<sup>[1]</sup>, 我国有 9.8 万座水库, 数量居世界首位。在社会发展、气候变化、坝龄增长等背景下, 如何进一步提高水库大坝安全管理水平, 充分发挥水库功能, 确保水库安全, 已成为我国水库管理领域十分现实和非常紧迫的问题。工程实践表明, 通过对水库大坝进行现场检查和仪器监测, 实时整编和分析监测资料, 可及时发现水库大坝的异常, 预测大坝的未来安全性态和发展

趋势。因此, 应定期依据监测资料分析和评价大坝状态, 控制大坝运行, 防止灾害的发生<sup>[2,4]</sup>。

瑞士十分重视大坝安全, 1877 年政府便出台了《瑞士联邦水利工程督察法》。1957 年, 关于大坝安全的条例颁布, 确立了大坝安全理念及目标。经过多年的实践, 瑞士已形成了职责明确、实用高效的大坝安全监控模式。瑞士的大坝安全监控模式处于国际领先水平, 至今保持全国无一例溃坝的骄人纪录,

基金项目: 国家自然科学基金(51779155, 51879169)

作者简介: 马福恒(1969—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事大坝安全评价和监控研究。E-mail: fhma@nhri.cn

通信作者: 胡江(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事大坝监控和老化病害机理研究。E-mail: huj@nhri.cn

是国际大坝安全管理的楷模。为了学习借鉴瑞士水库大坝运行管理理念、方法,提高我国水库运行管理水平,中国水利部与瑞士联邦能源署(SFOE)、环境署(FOEN)和合作发展署(SDC)于2009年启动了为期5年(2009—2014年)的“中瑞大坝安全加固项目”,该项目旨在通过借鉴瑞士在大坝安全监控方面积累的先进方法、经验、信息及技术,提高中国大坝安全管理水平。

本文简要归纳了瑞士的大坝安全法规和安全管理模式,深入剖析了瑞士的大坝安全监控机制;总结分析了我国水库大坝的安全管理机制和安全监控系统;在此基础上,对比分析了两国水库大坝安全监控机制的异同,提出了瑞士大坝安全管理和监控经验对我国水库大坝安全监控的启示,以及进一步完善我国水库大坝安全监控体系的建议。

## 1 瑞士大坝安全监控机制

### 1.1 大坝安全法规体系及理念

#### 1.1.1 大坝安全法规体系

瑞士大坝业主组成明确,83%的大型水库和大部分小型水库业主为股份公司,个人、州政府或市镇政府参股;其余小部分以社会效益为主的大坝的业主由州政府或市镇政府担任<sup>[5]</sup>。SFOE负责全瑞士大坝安全监管工作,制定法规制度和技术标准,直接监管大型坝,以及间接监管小型坝;州政府监管机构直接监管小型坝,同时接受SFOE监督和指导<sup>[6]</sup>。

瑞士大坝管理法律法规和技术标准分4级,即《瑞士联邦宪法》《瑞士大坝法》《瑞士大坝条例》和技术指南。《瑞士联邦宪法》要求对建筑物建立安全制度以确保安全。《瑞士大坝法》明确了大坝建设与管理、大坝应急管理、大坝建设管理与法律保护、刑事裁定与法律保护等内容。《瑞士大坝条例》是为执行《瑞士大坝法》所做的具体规定。技术指南主要包括特殊危险标准及结构安全、地震安全、防洪安全、监控维护和应急计划等指南。

#### 1.1.2 大坝安全管理理念

大坝安全管理的目标是减小风险和控制残余风险

险<sup>[7-9]</sup>。为实现这一目标,瑞士从3个方面开展工作。

a. 结构安全。监管机构在建设前期审核施工计划,建设过程中全程监督施工,批准同意水库初次蓄水,确保结构安全,为运行期提供基础。

b. 安全监控。在大坝整个生命周期,业主开展仪器监测、巡视检查和设施检测,及时发现缺陷和异常险情,避免险情,并定期向监管机构提交安全报告。监管机构监管业主,使其开展的监控符合法律规定与大坝安全的需要,并要求其采取合适的措施保证大坝安全。

c. 应急计划。《瑞士大坝条例》规定每座大坝都应制订应急预案,预防和控制残余风险,且一旦发生突发事件,能调用一切措施避免危及人员、财产和环境安全。瑞士大坝安全管理理念如图1所示。

## 1.2 大坝安全监控

### 1.2.1 大坝安全监控的任务

大坝安全监控内容主要包括:①检查水库、坝体、坝基及附属设施的状况;②测试泄、输水建筑物的机电设备及水位预警预报设施;③监测环境、坝基及大坝性态。

《结构安全指南》中提出了大坝安全监控的基本流程,如图2所示。通过检查、测试形成监测信息,评价监测信息的合理性和有效性,形成大坝年度检查报告及年度安全报告,以了解大坝的行为、状态及适用性;在此基础上,做出采取专门措施、维护或加固等决策,达到馈控大坝风险的目的。

大坝安全监控的基本任务为:①运行管理人员负责检查监测设施的有效性和监测数据的可靠性,填写值班日志,并有效管理监测数据;②业主负责持续监控大坝安全,评估大坝安全状况;③无论大坝安全状况是否正常,业主都应定期向监管机构汇报监控结果;④资深工程师确认、签署监测数据,分析和评估大坝安全状况,每年至少向监管机构提交1次大坝安全检查报告;⑤至少每5年1次向监管机构提交由土木或地质专业的独立专家编制并签名的大坝安全报告。

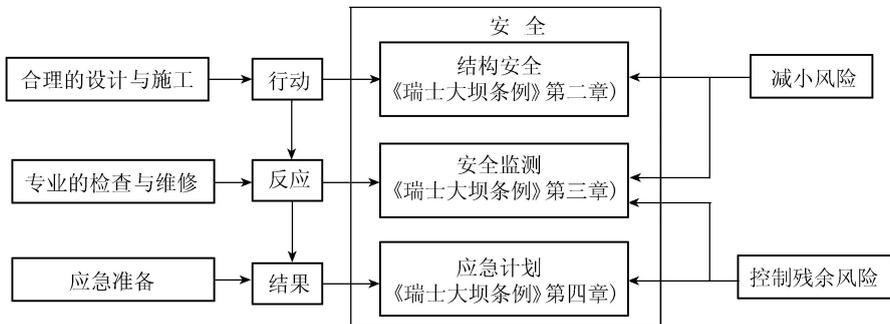


图1 瑞士大坝安全管理理念示意图

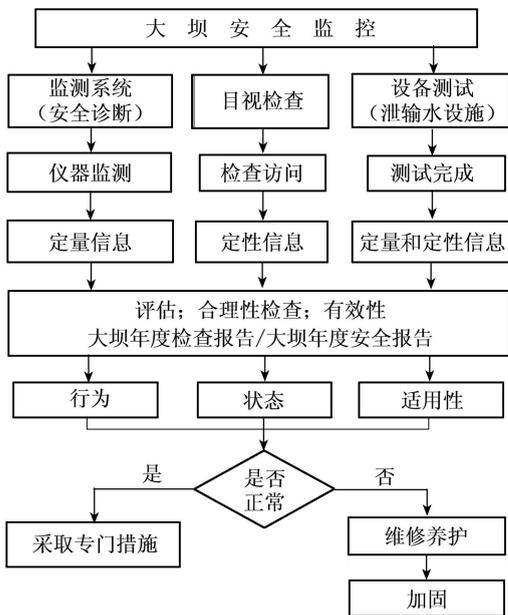


图2 瑞士大坝安全监控流程

### 1.2.2 安全监控组织体系

大坝安全监控是一个系统的监测到反馈的过程,是瑞士大坝安全管理的重要基础。如图3所示,《瑞士大坝条例》提出了4个层次的大坝安全监控组织体系,分别为运行管理人员(L1层大坝运行管理人员)、资深工程师(L2层工程师)、专家工程师(L3层专家)和监管机构(L4层监管机构)。通过立体式的4级监控制度,实现大坝安全的有效监控。

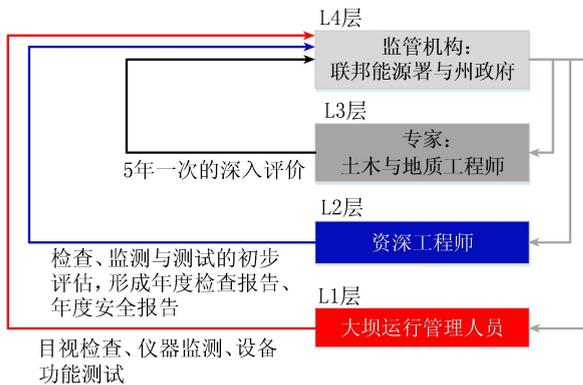


图3 瑞士大坝安全监控体系

从图3可看出,通过L1层大坝运行管理人员的连续检查、监测与测试、L2层工程师每年的监测评估、L3层专家每5年1次的深入的安全评估、L4层监管机构的监督管理及各层人员间的互动交流,安全监控体系持续地运转执行。在这一监控体系中,每个层次的人员都有明确的分工和职责,并强调相互间的沟通,以便于发现问题及时处理。其中,L2层工程师处于承上启下的位置,是掌握大坝信息和辨识大坝安全状态的关键。

a. L1层大坝运行管理人员。L1层大坝运行管理人员按L2层工程师规定的频次开展全面的现场

检查和仪器监测,及时整理整编数据;测试并维护安全设备及监测设施。L1层大坝运行管理人员是大坝安全监控的“耳目”,能觉察问题、发现问题和及时报告问题,在大坝监控工作中至关重要,是大坝安全监控的基础。L1层大坝运行管理人员由业主聘请,但要征得L2层工程师的同意,并接受L2层工程师的培训指导,以熟知大坝的设计承载力、溃坝模式和溃坝诱因等。L1层大坝运行管理人员需熟知设备性能,需判断观测数据的可靠性,如有异常即刻复测。自动化监测数据需人工比对、确定无误后上报。

b. L2层工程师。L2层工程师培训和指导L1层大坝运行管理人员,并检查人员资格;每年至少开展1次全面的现场检查,分析当年监测结果,编写大坝年度检查报告与安全报告,报告大坝安全状况;为L3层专家的5年定期评估提供基础资料;制订运行维护方案。大坝安全年度报告是L2层工程师的重要工作,包含了当年大坝运行和监测情况、大坝和设备维护情况、大坝监测数据及其变化规律、大坝安全状况的结论和意见等内容,并重点关注大坝退化和异常现象。L2层工程师是大坝安全状况的跟踪者,是L1层大坝运行管理人员的指导者,也是L3层专家和L4层监管机构工作依据的提供者。L2层工程师必须有5~10年的工作经验,由业委会委派,可为业主机构的人员,也可为聘请的专业人员,但需监管机构认可同意。L2层工程师持续服务于一座大坝,跟踪大坝状况变化。一座大坝的L2工程师可为一人或多人,同一资深工程师可为一座或多座大坝提供服务。

c. L3层专家。对坝高 $H \geq 40$  m或 $H \geq 10$  m、库容 $V \geq 100$ 万 $m^3$ 的大坝应设置L3层专家。L3层专家基于安全监测、现场检查、放水测试等数据,每5年开展1次深入的大坝安全评估,综合分析评估大坝和设施安全状况、提出维修加固或专题研究等措施建议。一般地,一座大坝的L3层专家至少应有结构和地质工程师各1名。前者全面负责大坝、坝基的安全性态及发展趋势分析,结构稳定性评估,防洪安全性、抗震安全性复核,以及异常情况时处置措施的提出等。后者负责坝基、坝肩、库岸地质演变的评估、水文地质条件和水质分析等。L3层专家是连接L2层和L4层的桥梁,是大坝安全和整个安全监控体系的技术咨询专家。L3层专家应具备大坝设计和建设等经历,有10年以上的工作经验,并担任过L2层工程师。L3层专家由业主聘请,但独立于业主,且需监管机构确认。SFOE审核L3层专家的资质,全瑞士仅有30名L3层专家。每个L3层专家组建团队,并对团队成果负责。

d. L4 层监管机构。L4 层监管机构对 L1、L2、L3 层进行监督管理,确保安全监控的程序和提交的文件符合要求,审查年度报告及安全评估报告,确认大坝安全状况;制、修订大坝安全指南,监督有关机构的运行。出于安全考虑,监管机构必要时可令业主放空水库或降低库水位。SFOE 是瑞士大坝安全监管的最高机构,负责其直属管理的 222 座大坝的直接监管及其他大坝的间接监管工作。SFOE 的 L4 层工程师仅有 7 人。

## 2 中国大坝安全监控机制

### 2.1 大坝安全法规体系及理念

#### 2.1.1 大坝安全法规体系

在我国,水库是国有资产,业主是政府,实行分级负责的管理体制,各级水行政主管部门组建管理单位,进行水库大坝安全管理,但政府同时还承担水库大坝的安全监管职责。近年来,水库所有权趋于多元化,分属水利、电力、建设、农业等不同部门。为此,大坝安全监管逐渐形成了水行政主管部门会同相关部门监管的制度。

1981 年改革开放以来,以《中华人民共和国水法》《中华人民共和国防洪法》等国家法律为基础,以《水库大坝安全管理条例》《中华人民共和国防汛条例》等行政法规为核心,部门规章、规范性文件和配套标准,形成了一套适合我国国情的大坝安全管理的法规与标准体系。其中,部门规章以《水库大坝注册登记办法》、《水库大坝安全鉴定办法》、《水库降等与报废管理办法》等为代表,正逐步完善。20 世纪 90 年代以来,陆续颁布了 SL 258—2017《水库大坝安全评价导则》、SL 551—2012《土石坝安全监测技术规范》、SL 601—2013《混凝土坝安全监测技术规范》、SL 210—2015《土石坝养护修理规程》、SL 230—2015《混凝土坝养护修理规程》、SL 605—2013《水库降等与报废标准》、SL 530—2012《大坝安全监测仪器检验测试规程》、SL 621—2013《水库大坝安全监测仪器报废标准》等技术标准,正在编制《大坝安全监测系统鉴定技术规范》《大坝安全监测数据库表结构与标识符》等技术标准,大坝安全相关的技术标准体系仍在不断建设中。

#### 2.1.2 大坝安全管理理念

进入 21 世纪以来,我国提出了大坝安全管理的新理念,包括工程措施与非工程措施相结合、水库大坝工程系统的风险管理等。风险管理被提上日程,表明我国水库大坝的安全管理已进入一个更高层次的发展阶段<sup>[10]</sup>。

## 2.2 大坝安全监控

### 2.2.1 大坝安全监控内容

大坝安全监控内容主要包括:①根据工程规模、等级,布设安全监测仪器,开展现场检查 and 仪器监测;②及时整编整理监测数据,随时掌握大坝安全状况,发现异常现象时,立即报告主管部门,并及时采取措施;③坚持大坝的日常维养,保证大坝和闸门启闭设备完好。

### 2.2.2 安全监控组织体系

a. 一线运行操作维护人员。一线运行操作维护人员相当于瑞士 L1 层大坝运行管理人员。一线运行操作维护人员依据规范开展现场检查和仪器监测,做好监测设施的检查、维护和更新工作;定期整编监测资料;定期开展金属结构和启闭设备的检查、修护。特殊情况时,应加强巡视检查及重点部位的监测。日常安全监测及监测数据整编分析过程中发现异常时,应分析原因,及时上报主管部门。

b. 专业工程师。专业工程师相当于瑞士 L2 层工程师。专业工程师指导一线人员,并在每年汛前、汛后,按规定的检查程序对大坝进行全面的现场检查;审阅大坝安全监测和运行维护记录等;提出大坝安全年度检查报告。特殊情况时,开展应急检查。

c. 专业机构。专业机构相当于瑞士 L3 层专家。 $H \geq 15 \text{ m}$  或  $V \geq 100 \text{ 万 m}^3$  水库的大坝,实行定期安全鉴定制度。首次鉴定应在竣工验收后 5 年内进行,以后应每隔 6 ~ 10 年进行 1 次。运行中遭遇特大洪水、强震或出现异常现象时,应组织专门的安全鉴定,如聘请有资质的专业机构对大坝安全状况进行分析评价,提出安全评价报告。监管机构组织专家评审评价报告,提出鉴定意见,最终确定大坝安全级别,并提出管理要求。

d. 水行政主管部门。有管辖权的水行政主管部门执行监督职能,相当于瑞士 L4 层监管机构。各级监管机构对大坝进行不定期抽查,如督查、不定期安全抽查等。

## 3 中瑞大坝安全监控机制的对比

### 3.1 基本情况

a. 中瑞两国水库功能不同。我国水库社会责任重,绝大多数水库修建的目的是防洪、灌溉、供水等社会效益,政府承担业主的角色,运行维护经费依靠财政,一些经济落后地区无力负担公益性水库运行维护经费,出现了公益性水库无人管理的局面。瑞士绝大部分水库的功能主要为经济效益,且效益较好,可将业主管理和政府监管分离。

b. 中瑞两国水库大坝复杂程度不同。两国大

坝数量、坝型分类、坝高分布都存在很大差异:①大坝数量。我国有 9.8 万座水库,瑞士大坝总数仅 1 200 座。②坝型分类。我国水库大坝包括了各类坝型,而瑞士则主要是拱坝、重力坝和土坝。③坝高分布。我国水库大坝坝高在 300 m 及其以下都有分布,增大了管理难度。

c. 中瑞两国历史经历不同。两国水库建设和管理的历史均较长,建坝高峰期都为 1950—1970 年,但在管理制度上历史经历差异很大。瑞士早在 1957 年就已制定了《瑞士大坝条例》。我国第一部专门针对大坝安全的法规为 1991 年颁布实施的《水库大坝安全管理条例》。

d. 中瑞两国发展程度不同。瑞士是高度发达国家,大坝的建设和管理遵循市场运作规律。我国还处于发展阶段,提高大坝安全管理整体水平有赖于外部环境的进一步完善。

### 3.2 安全管理理念

瑞士大坝安全管理的目标是控制残余风险,既重视安全,又关注风险。我国大坝安全管理也正在向风险管理转变,但由于起步晚,还存在诸多问题,如仍根据大坝等级和规模而非溃坝后果开展安全监测,监测资料整编不及时,这些都还未体现出风险管理的理念<sup>[11-12]</sup>。

### 3.3 安全监控组织体系

我国大坝安全监管实行中央、省、市、县、乡镇分级监管且上级指导下级的模式,这与瑞士实行的联邦、州、市(镇)分级监管模式相似,但我国的监管层级较多,这是由我国地域辽阔、大坝数量众多的特点决定的。

瑞士重视 L1 层大坝运行管理人员的培训,使其熟知大坝的功能和作用、结构的不足之处和安全隐患;强化 L1 层大坝运行管理人员的管理,定期检查安全监测的原始数据、监测日志和仪器设备的维养记录;强调 L1 层的人工校测而非无人值守。相对而言,我国一线运行操作维护人员责任意识还不够强,过于依赖自动化监测,不能及时整编分析监测数据。

在瑞士,L2 层工程师负责组织 L1 层大坝运行管理人员开展工作,并编制和报送年度报告,作用十分重要。在我国,一线运行操作维护人员和专业工程师一起工作,若专业工程师能很好发挥作用,比瑞士的模式更好。但是,由于责任落实不到位,一线运行操作维护人员和专业工程师主动工作和履职的风气尚未形成,也很少建立与专业机构的长期联系。众多面广量大的小型水库无专业人员,大坝安全监控力度明显不足。

瑞士的 5 年评估报告主要基于各年度的安全监

测、放水测试及年度安全报告等完成,安全评估结论无安全级别分类。我国暂无年度报告制度,对现场检查重视程度不足、安全监测资料分析工作深度有待加强。

总体而言,瑞士的大坝安全监控体系职责明确、实用高效。我国已组建管理单位的大坝安全监控模式与瑞士相似,在整体架构上没有本质区别,但实际效果相比瑞士还存在一定差距。

## 4 瑞士经验对中国大坝安全监控机制的启示

a. 增强主动安全监控意识。激发一线运行操作维护人员和专业工程师的责任心,始终保持警觉,积极主动开展大坝安全监控。由专业工程师有效组织安全监测工作,在大坝全生命周期过程中,根据大坝安全状态调整监测频次;判断是否需要完善和更新仪器设备,必要时寻求专业机构的帮助。

b. 创新大坝安全管理模式。经济效益较好、维养经费渠道稳定、管理队伍素质较高的水库大坝,可完全借鉴瑞士的成熟模式,加强岗位管理,明确岗位职责;引进专业咨询机构,建立起政府监督、业主负责、专业咨询机构参与、各层次人员密切互动的安全管理模式,促进大坝安全监控机制的良性循环。

c. 完善大坝安全监管体系。增设年度报告制度,重视现场检查与人工监测,力求规范严谨。大型和有条件的中型水库配备资深工程师;条件不足的中型和小型水库可按片区配备有资质的专业机构或资深工程师,分片集中开展安全监测和年度报告编制工作。完善安全评价方式,加强观测设施可靠性评价,以及对安全监测数据的分析;现状调查阶段提出需要重点复核的专题,将现有的大坝安全评价由多且繁变为少而精;拓展专业机构职责,明确专业机构的跟踪机制;推进评价专家负责制。

d. 提出放水测试制度。相关制度中明确泄、输水建筑物的金属结构和机电设备测试工作,结合泄、输水建筑物实际运行情况,提出工况要求、测试内容、报告要求、免检条件等测试要求。

e. 引入物联网、大数据等先进技术。引入智能化的物联网技术,结合传统现场检查方法,全面感知大坝运行情况,通过大数据、云计算等系统分析大坝可能存在的质量安全、运行调度等安全隐患,结合创新的大坝安全管理模式,加强小型水库安全监控<sup>[13-15]</sup>。

## 5 结 语

瑞士的大坝安全管理重视各级人员的专业资质和工作能力,强调监控人员的动态管理;监测系统实

用可靠、维护到位,发挥了大坝安全“耳目”的作用;依据现场检查、安全监测和放水测试成果,实现了大坝安全状态的准确评估。我国已建立的大坝安全监控体系与瑞士相似,但实际效果相差甚远,众多面广量大的小型水库无专业技术人员,安全管理力度不足;管理单位内部分工不清,主动监控意识尚未形成。为此,可借鉴瑞士大坝安全监控的成熟模式,增强主动安全监控意识,创新大坝安全管理模式,完善大坝安全监管体系。

瑞士安全监控按照库容、坝高对大坝进行规模分类,体现风险概念;我国大坝安全监测工作依据大坝的规模和等级开展,有一定的片面性,不能充分体现风险管理概念,造成了安全监测、管理设施配备与大坝风险程度不匹配的问题。因此,应结合库容、坝高,建立以风险管理理念为基础的安全监测、检查测试、安全评价和运行维护等安全监控体系,同时,还可引入物联网等先进技术,提升量多面广小型水库的安全监控水平。

#### 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

[2] 马福恒, 李子阳, 胡江. 土石坝安全监控与预警技术及应用[M]. 南京:河海大学出版社, 2016.

[3] 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.

[4] 胡江, 苏怀智, 马福恒, 等. MF-DFA 在大坝安全监测序列分析和整体性态识别中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(3):50-55. (HU Jiang, SU Huaizhi, MA Fuheng, et al. The application of MF-DFA in time series analysis and global state recognition of dam safety monitoring [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(3): 50-55 (in Chinese))

[5] 贾金生, 徐耀, 郑瑾莹. 国外水电发展概况及对我国水电发展的启示(六):澳大利亚大坝安全管理[J]. *中国水能及电气化*, 2010(10): 25-28. (JIA Jinsheng, XU Yao, ZHENG Cuiying. Dam safety management and green hydropower certification in Switzerland[J]. *China Water Power & Electrification*, 2010(10): 25-28. (in Chinese))

[6] 张士辰, 彭雪辉. 瑞士大坝应急管理特点及其对中国的启示[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(11): 180-184. (ZHANG Shichen, PENG Xuehui. Characteristics of emergency management on dam in Switzerland and its inspiration for China[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 180-184. (in Chinese))

[7] 李雷, 蔡跃波, 盛金保. 中国大坝安全与风险管理的

现状及其战略思考[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(11): 1581-1587. (LI Lei, CAI Yuebo, SHENG Jinbao. Dam safety and risk management in China and its strategic consideration [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(11): 1581-1587. (in Chinese))

[8] LOU J K, 李雷, 盛金保. 中国与加拿大的大坝安全管理比较及对策建议[J]. *中国水利*, 2008(20): 29-31. (LOU J K, LI Lei, SHENG Jinbao. Dam safety management: comparison of China and Canada[J]. *China Water Resources*, 2008(20): 29-31. (in Chinese))

[9] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. *水利学报*, 2018, 49(1): 26-35. (GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 26-35. (in Chinese))

[10] 刘宁. 现代大坝安全管理的理念和内涵[J]. *中国水利*, 2008(20): 6-9. (LIU Ning. New concepts and contents of dam safety management [J]. *China Water Resources*, 2008(20): 6-9. (in Chinese))

[11] 谷艳昌, 王士军, 庞琼, 等. 基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(4): 480-487. (GU Yanchang, WANG Shijun, PANG Qiong, et al. Study on early warning index of concrete dam's deformation based on the risk management[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(4): 480-487. (in Chinese))

[12] 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))

[13] 王长生, 马福恒, 何心望, 等. 基于物联网的燕山水库大坝智能巡检系统[J]. *水利水运工程学报*, 2014(2): 48-53. (WANG Changsheng, MA Fuheng, HE Xinwang, et al. Intelligent inspection system for Yanshan reservoir dam based on the internet of things technology [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(2): 48-53. (in Chinese))

[14] 沈振中, 陈允平, 王成, 等. 大坝安全实时监控和预警系统的研制和开发[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(3): 68-72. (SHEN Zhenzhong, CHEN Yunping, WANG Cheng, et al. Development of real-time monitoring and early warning system of dam safety[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(3): 68-72. (in Chinese))

[15] HU Jiang, MA Fuheng, WU Suhua. Anomaly identification of foundation uplift pressures of gravity dams based on DTW and LOF[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2018, 25(5): e2153.

(收稿日期:2018-04-13 编辑:雷燕)