

# 考虑风险与社会支付意愿的大坝长效服役决策

陈波<sup>1,2</sup>, 黄梓莘<sup>3</sup>, 郑付刚<sup>4</sup>, 吴邦彬<sup>1,2</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. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国电建成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 鉴于大坝长效服役决策需满足严格的工程技术要求, 同时兼顾一系列复杂的社会、经济、环境和生态问题的特性, 阐述了水库大坝长效服役决策的总体思路, 探讨了除险加固、工程降等、拆除退役或近坝址重建等大坝长效服役的可选措施。在计算大坝服役可靠度的基础上, 引入生命质量指数, 衡量社会经济水平提高和人们生活质量改善对大坝长效安全服役要求的综合提升, 据此提出了考虑大坝安全风险和社会支付意愿的大坝服役性能提升措施的决策判据。对一座存在一定坝体失稳风险的某混凝土重力坝提升服役性能措施进行了推荐, 建议采取水库水位降低 10 m 运行或大坝补强加固的措施提升大坝长期服役性能, 与工程实际吻合。

**关键词:** 大坝; 长效服役决策; 风险管理; 生命质量指数; 社会支付意愿

**中图分类号:** TV698.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2019)04-0035-06

**Decision-making method of dams for long-term service considering risks and social willingness to pay//CHEN Bo<sup>1,2</sup>, HUANG Zishen<sup>3</sup>, ZHENG Fugang<sup>4</sup>, WU Bangbin<sup>1,2</sup>** (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *Chengdu Engineering Co., Ltd., Power China, Chengdu 610072, China*)

**Abstract:** The decision-making of dams for long-term service needs to strictly meet the engineering and technical requirements, as well as considering a series of complex social, economic, environmental and ecological issues. This paper presents the general idea of the decision-making method for dams and reservoirs of long-term service, and discusses the optional life promotion measures, including reinforcement, degradation, retirement by demolition and reconstruction near the dam site. The life quality index (LQI) is introduced to evaluate the comprehensive improvements of the dam life promotion measures caused by social life quality improvements based on the calculation of dam service reliability. The decision-making criteria of dam performance promotion measures are then proposed based on LQI and the social willingness to pay. Finally, a concrete gravity dam with stability risks was taken as an example and the optimal engineering measures of performance promotion were recommended. It is suggested to operate with a 10 m reduction of the reservoir water level or with suitable dam reinforcement measures to promote the long-term service performance, consistent with engineering practice.

**Key words:** dam; long-term service decision making; risk management; life quality index; social willingness to pay

长期服役的大坝, 由于受到多重环境因素(如冻融循环、干湿循环、溶蚀或侵蚀、碱集料反应、温度疲劳、碳化等)与力学因素(如水压力、扬压力等)的长期作用, 其局部和整体服役性态均会产生不可逆劣化衰退, 给工程安全带来极大威胁。据 20 世纪初统计, 中国 3 100 多座大中型水库大坝中约有 30% 存在不同程度的病险问题, 尤其是 20 世纪 50—70

年代修建的大坝, 很多工程建设标准偏低、工程质量较差, 加之后期维护管理不到位, 导致大坝功能丧失, 经济效益衰退, 部分甚至有溃坝的危险<sup>[1-2]</sup>。水利部大坝安全管理中心统计显示, 1954—2014 年我国共有 3 530 座水库大坝溃决<sup>[3]</sup>。1975 年, 包括板桥、石漫滩 2 座水库在内的 62 座水库大坝溃决, 造成 2.6 万人死亡, 1 000 多万人受灾<sup>[4]</sup>。因此, 对长

期运行的病险水库采取工程与非工程措施来提升大坝长效服役性能,对于有效降低病险水库大坝服役风险,充分发挥工程的社会经济效益显得尤为重要。

目前,部分学者主张建立合适的大坝退役制度以降低病险水库的服役风险,截至2012年底,美国共拆除退役了1057座大坝,大多数为支流上坝高10m以下的小坝和服役期超过70a的老坝,拆除的原因包括经济效益衰减、结构老化、威胁公共安全和生态恢复需要等<sup>[5]</sup>。然而,大中型水库大坝的建设投资高昂,发挥的社会经济效益巨大,长期运行后拆除带来的生态风险也较难估量,因此,亟须引入多种技术手段来丰富病险大坝服役性能提升的措施库<sup>[6]</sup>。彭辉等<sup>[7]</sup>在收集大量文献和已有研究的基础上,绘制了病坝拆除决策步骤流程图,研究了决策过程中的若干关键问题;杨杰等<sup>[8]</sup>针对病险水库大坝除险加固方案优选理论方法的缺失和不足,提出基于区间数GRA决策与AHP-Entropy主客观综合赋权的除险加固方案决策方法。在多种提升病险大坝长效服役性能的技术手段中选择一个最优处理方案,是一个复杂的多目标决策问题,可采用生命质量指数(LQI)来考量。生命质量指数<sup>[9-11]</sup>从社会层面来优化工程风险,将风险可接受性作为社会事件,用来描述当前社会经济水平下,公众为控制风险而愿意支付的费用,是风险决策领域的研究热点之一<sup>[12-13]</sup>。

本文主要针对运行多年的大中型病险水库大坝,兼顾大坝安全风险、社会效益和社会支付意愿,综合考量除险加固、工程降等、拆除退役、近坝址重建等大坝长效服役措施的效果,为病险大坝的长效服役决策提供参考。

## 1 大坝长效服役决策的总体思路

### 1.1 大坝长效服役决策的方案集

运行多年的水库大坝,受交变荷载和环境因素的长期作用,会引起结构损伤开裂、稳定安全系数降低、功能丧失、经济效益衰退等老化病险问题,对工程运行产生较大安全风险。为保障这些大坝的安全性,应在结构可靠度分析或风险分析的基础上,权衡工程和非工程措施,合理选择出安全与经济最优服役方案。对于不满足服役可靠性的大中型水库大坝,其长效服役决策的方案集包括除险加固、工程降等、拆除退役、近坝址重建等。

**a. 除险加固。**一般意义上的病险水库指防洪标准不够、存在安全隐患、不能按照设计条件运行的水库大坝工程。随着时间的推移,这些工程自然老化加剧,在极端荷载工况下引起工程损毁的风险高,一旦失事,对下游的灾害损失不可估量。应对这些

水库优先采取除险加固措施以消除安全隐患,提升大坝的长效服役性能。如20世纪80年代的佛子岭水库大坝运行后产生众多温度裂缝,通过除险加固的方式至今已安全服役30多年<sup>[14]</sup>。2007年,中国制定了《全国病险水库除险加固专项规划》,又有86座大型水库和1096座中型水库列入除险加固规划中<sup>[1]</sup>。

**b. 工程降等。**我国水利部2003年颁布的《水库降等与报废管理办法》(试行)指出,对于规模减小或者功能萎缩(如严重淤积、设计效益被其他工程代替、抵御洪水标准不能满足、存在严重质量问题等),且在扩建与补强技术上不可行或者经济上不合理的水库,可将原设计等别降低一个或者一个以上等别。

**c. 拆除退役。**对于病险严重且除险加固技术上不可行或者经济上不合理的水库以及功能基本丧失的水库,需要采取报废退役的处置措施,技术经济可行时还需要将其拆除,以降低工程风险,恢复生态平衡。目前,国际上拆除退役的水库大坝除华盛顿州埃尔瓦河上70m高的格莱斯恩山谷坝和15m高的埃尔瓦坝,以及南加利福尼亚坝高57.9m、库容2230万m<sup>3</sup>的Matilija大坝外,其余绝大多数为15m以下的小型工程,建设投资高昂、工程经济效益巨大的大中型水库大坝工程不多。以防洪、防凌、蓄水、供水和发电为主要功能的三门峡大坝坝高106m,水库库容360亿m<sup>3</sup>,在蓄水运行后产生了严重的泥沙淤积,潼关高程持续抬高,2003年渭河出现洪峰流量不大但洪水灾害严重的现象<sup>[15]</sup>,该工程的防洪、防凌、供水等功能已由下游梯级水库小浪底枢纽工程承担。目前,是否拆除退役这类社会经济效益不显著的大中型水库大坝还在争论中。

**d. 近坝址重建。**鉴于大中型水库大坝发挥的工程经济效益巨大,倘若水库大坝发生严重病险且需要报废退役,可以考虑在原坝址附近重建一座新坝,通过技术经济分析综合考量重建方案投入与工程社会效益、原坝拆除费用、拆除风险成本等的关系,争取获得最大的社会效益。如20世纪三四十年代建设的丰满大坝因材料老化而接近使用寿命,已采取在下游100余米处建立新坝的方案<sup>[16]</sup>,老坝将在工程建设期作为上游挡水围堰,建设完工后沉入新库中退役。

### 1.2 大坝长效服役决策的技术路线

首先,长期运行的水库大坝每隔6~10a需进行大坝安全定检,全面检查大坝在外部作用因素(如库水、温度、地下水、地震等)和内部因素(如材料老化、坝体结构变异、基础变异等)影响下的工作性

态,综合给出大坝服役安全性的定性结论。其次,采取可靠度分析方法定量计算大坝运行的可靠度。若大坝可靠度满足安全运行要求,则大坝继续正常服役;若不满足,则需要制定大坝服役性能提升方案,即根据1.1节给出的方案集,根据工程条件设计满足大坝服役可靠度要求的方案。最后,对设计备选方案开展决策分析,合理选择出安全与经济最优服役方案。

## 2 大坝服役可靠性的评估方法

大坝的安全可靠性一般采用结构可靠度或服役风险等指标来量化。总体来说,大坝的可靠性可采用功能函数  $Z(T)$  来反映:

$$Z(T) = R(T) - S(T) = g(X_1, X_2, \dots, X_n, T) \quad (1)$$

式中: $R(T)$ 为大坝自身抗力的随机变量; $S(T)$ 为大坝承受荷载效应的随机变量; $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为反映大坝可靠度的功能指标,为随机变量; $T$ 为时间。 $Z(T) > 0$ 表示大坝安全可靠, $Z(T) < 0$ 表示大坝失效破坏, $Z(T) = 0$ 表示大坝安全处于临界状态。

将大坝服役时间离散分割成若干个长度相等的时段,则大坝的服役风险率  $p_f$  可表示为

$$p_f = P(Z(T) < 0) = \iint_{Z(T) < 0} \dots \int f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

式中: $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为大坝功能函数在时间域上离散后的概率密度函数。

假设大坝可靠性功能函数满足均值为  $\mu_Z$ 、方差为  $\sigma_Z$  的正态分布,即  $Z(T) \sim N(\mu_Z, \sigma_Z)$ ,则大坝的服役风险率满足:

$$p_f = P(Z(T) < 0) = \int_{-\infty}^{\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为可靠度函数; $\beta$ 为可靠度; $z$ 为大坝可靠性功能函数的值。

据此可得到某一时刻大坝的可靠度,具体步骤如下:先根据大坝可能的破坏模式,建立功能函数式(1),然后搜集各随机变量资料,确定统计参数,根据式(3)给出的函数关系,利用数值方法计算大坝的即时可靠度。

## 3 大坝长效服役措施的决策模型

### 3.1 长效服役措施的提升效果度量指数

存在较大服役风险的水库大坝,需要采取合理的工程与非工程措施来提高大坝可靠性。不同的措施对大坝可靠度的提升效果不同,其经济投入和对

社会的影响往往也有较大差异。引入生命质量指数来衡量社会经济水平提高和人们生活质量改善对大坝长效安全服役要求的综合提升。

生命质量指数将人们享受生活的程度归结生命效用(lifetime utility),即余生的消费总量,考虑到一个人可以用来享受的资源以及用于娱乐的时间这两个决定生命质量的主要因素,则人的生命效用期望值可表示为

$$L(a) = \frac{\int_a^{t_u} f_s(t) \int_a^{t_u} u[c(\tau)] \exp[-r(\tau - a)] d\tau dt}{\int_a^{t_u} f_s(\tau) d\tau} \quad (4)$$

式中: $f_s(\tau)$ 为人活到年龄  $\tau$  的概率密度函数; $c(\tau)$ 为当年消费水平; $u[c(\tau)]$ 表示消费实现的生命效用函数; $a$ 为人的即时年龄; $t$ 为死亡年龄; $r$ 为折现率; $t_u$ 为人类最大年龄上限, $t_u \approx 100$ 。

若假设  $f_s(\tau)$  和  $u[c(\tau)]$  为连续函数,交换积分顺序,即先计算人存活到年龄  $\tau$  的概率,然后再与当时消费效用相乘积分得到生命效用。定义存活概率函数  $S(0, t) = \int_t^{t_u} f_s(\tau) d\tau = \exp\left[-\int_0^t m(\tau) d\tau\right]$ ,其中  $m(t)$  为  $t$  时死亡率(或灾难发生率);同时,假设消费水平保持为常量,即  $u[c(\tau)] = u(c)$ ,则人的生命效用期望值可变换为

$$L(a) = u(c) \int_a^{t_u} \exp\left[-\int_a^\tau [r + m(t)] dt\right] d\tau = u(c) e_r(a) \quad (5)$$

式中: $e_r(a)$ 为该人剩余折现寿命。

社会层面上的生命质量是所有个体生命质量的综合体现,社会生命质量指数应该是  $L(a)$  在人口年龄和消费水平分布上的积分。假设全社会平均消费水平等于实际人均年国民生产总值  $G$ ,人口年龄分布为  $f(a)$ ,则社会层面上的生命质量指数为

$$L = E[L(a)] = \int_0^{t_u} L(a) f(a) da = G^q E \quad (6)$$

式中: $E$ 为社会人口的平均折现寿命期望值; $q$ 为效用弹性指标。

大坝的任何长效服役措施,都会影响周边地区人们的生命质量指数。如大坝需要降低水位运行时,此时可能导致枯水期发电、灌溉、航运或城镇供水的水量减少,使得人均年国民生产总值减小,但是水位的降低降低了大坝失事的风险,提高了下游人们财产和生命的保证率<sup>[17]</sup>。基于净收益准则,服役提升方法应使生命质量指数的微小相对变化为正(表示人们生活水平提高),即

$$\frac{dL}{L} = q \frac{dG}{G} + \frac{dE}{E} + \ln Gdq > 0 \quad (7)$$

式中: $dG$ 为某提升方法引起的经济损失(如实施工程加固措施所需要的费用,为负值)或经济收益(如水库水位提高带来的效益,为正值)的变化; $dE$ 为由于风险改变导致的公众预期寿命期望值的变化; $dq$ 为该措施引起的效用弹性指标的变化,该指标难以直接量化,可以近似认为 $dq=0$ 。

式(7)中寿命期望值的相对变化量 $dE/E$ ,可以通过死亡率改变的经验公式<sup>[18]</sup>来计算:

$$\frac{dE}{E} \approx -C_{F8} \frac{dm_0}{m_0} \quad (8)$$

式中: $m_0$ 为自然死亡率; $C_{F8}$ 为常量,是人活到某一年龄概率的度量,其值随着时代的发展而变化。

因此,根据采取长效服役措施前后的生命质量指数的变化,可以度量提升效果和经济投入的合理性。当 $dL$ 为正时,表示该提升方法满足社会公众对大坝风险控制和经济投入的要求,是较合理的提升方法,并且 $dL$ 值越大表示该方法越能满足社会发展目标。

### 3.2 基于生命质量指数的长效服役措施决策判据

根据图1所示大坝长效服役决策技术路线,基于生命质量指数建立大坝服役性能提升措施的决策模型,如图2所示。其核心思想是首先对大坝采取服役性能提升方法的前后进行风险分析,并计算该方法所导致人们生活质量指数的变化,然后根据生活质量指数的相对变化 $dL/L$ 确定该提升方法的优劣:

$$\begin{cases} dL/L \geq 0 & \text{接受} \\ dL/L < 0 & \text{拒绝} \end{cases} \quad (9)$$

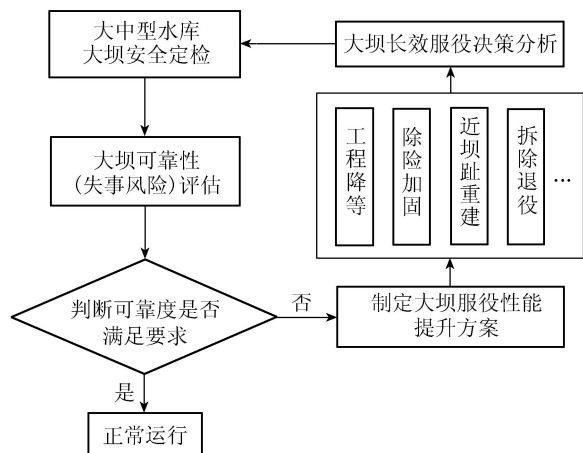


图1 大坝长效服役决策技术路线

当有多个可以接受的提升方法时,优先选择 $dL/L$ 值最大的方法,因为该方法比其他方法更能改善人们的生活质量。

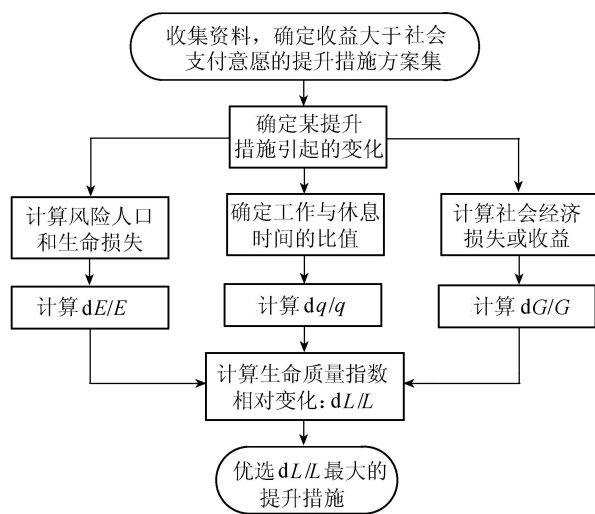


图2 基于生命质量指数的大坝服役性能提升措施决策模型

大坝服役性能提升方法风险决策的另外一个很重要的指标是人们可接受的费用支出水平即社会支付意愿(societal willingness to pay, SWTP),该指标来源于Hicks<sup>[19]</sup>提出的补偿变动。人均SWTP可以令 $dL/L=0$ 得到:

$$-dG = \frac{G}{q} \frac{dE}{E} + G \ln G \frac{dq}{q} \quad (10)$$

假设该大坝失事风险涉及的人群数为 $N$ ,则SWTP总和为

$$C = -NdG = \frac{NG}{q} \frac{dE}{E} + NGLnG \frac{dq}{q} \quad (11)$$

因此,若要确定为控制大坝服役风险而投入的资金 $C_m$ 是否合理时,可以根据SWTP来确定:

$$\begin{cases} C \geq C_m & \text{接受} \\ C < C_m & \text{拒绝} \end{cases} \quad (12)$$

## 4 算例

某水利枢纽工程以发电为主,兼有防洪、灌溉等综合效益。挡水建筑物为混凝土重力坝,最大坝高100 m,坝底高程0 m,坝顶宽度7 m,坝基宽度74.5 m,水库正常蓄水位95 m,下游水位10 m,调节库容11.22亿 $m^3$ 。水库下游为狭窄的河道,风险人口达46万。由于主客观条件的限制,工程建成后遗留下很多问题,最突出的是坝基加固处理不彻底,存在断层破碎带、裂隙密集带等不良地质情况,坝基抗剪强度较差,渗透性较大,使得坝体与坝基抗滑稳定成为威胁坝体稳定的最大风险,工程薄弱坝段的扬压力折减系数为0.6,摩擦因数 $f'$ 和黏聚力 $C'$ 分别为1和800 kN/ $m^2$ 。

运行管理者有4种供选择的大坝服役性能提升措施:措施1为维持现状;措施2为水库降低10 m运行;措施3为大坝补强加固,由于该混凝土坝缺陷

明显,可以快速确定大坝补强修复措施,即坝基固结灌浆和帷幕灌浆;措施4在坝址下游新建一座同等规格的大坝。下面采用基于生命质量指数的服役性能提升措施决策方法对4种措施进行比较,从而确定最优措施。

首先计算不同提升措施下的大坝失事风险,并进行失事后果分析。由于大坝失事风险因素较多,此处以风险最大的大坝失稳为例开展计算,并近似作为大坝风险率。

#### 4.1 大坝失稳风险率计算

由于没有进行坝基面上混凝土抗剪强度的试验,此处采用常规抗滑稳定公式,取水的容重为 $10\text{ kN/m}^3$ ,混凝土容重为 $24\text{ kN/m}^3$ ,根据坝体几何参数和坝体混凝土与基岩接触面抗剪断强度公式,建立重力坝坝段抗滑稳定功能函数:

$$g(H_u, H_d, \alpha, f', C') = (89868 + 3.75H_d^2 - 725H_d - 20H_u - 372.5H_u\alpha + 372.5H_d\alpha)f' + 74.5C' - 5H_u^2 + 5H_d^2 = 0 \quad (13)$$

式中: $H_u$ 和 $H_d$ 分别为上游水位和下游水位; $\alpha$ 为扬压力折减系数。

预计坝基加固处理后, $\alpha$ 由0.6降低为0.3; $f'$ 和 $C'$ 分别提高到1.2和 $1000\text{ kN/m}^2$ ,黏聚力变异系数降到0.2。另外,设上下游水位的相关系数为0.5; $f'$ 和 $C'$ 的相关系数为0.6。采用广义随机空间迭代方法<sup>[20]</sup>求解可靠度,表1给出了大坝维持现状时,大坝失稳计算的具体迭代过程。其余可靠度求解过程同表1,不再罗列。不同长效服役措施下大坝可靠度及对应的失稳风险率见表2。

表1 大坝失稳计算迭代过程

迭代次数	$H_u/\text{m}$	$H_d/\text{m}$	$f'$	$C'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\alpha$	$\beta$
0	95	10	1	800	0.6	2.5259
1	98.1837	10.1747	0.4688	271.7452	0.6830	2.5149
2	98.0437	10.1621	0.4673	262.3705	0.6418	2.5147
3	97.9915	10.1595	0.4651	263.2986	0.6413	2.5148
4	97.9879	10.1593	0.4650	263.2446	0.6410	2.5147
5	97.9873	10.1592	0.4650	263.2742	0.6410	2.5147

表2 不同措施下的大坝可靠度及失稳风险率

风险管理措施	$\beta$	失稳风险率/ $10^{-3}$
措施1	2.5147	6.0
措施2	2.8658	2.1
措施3	2.9205	2.4
措施4	3.6526	0.48

#### 4.2 失事后果分析

由于水库地处山区,坝体较高,属于高洪水风险区,取洪水强度为1。鉴于水库库容越小从大坝出现失事征兆到完全失事的时间越长的事实,结合我国国

情,假设水库正常水位运行时,大坝失稳提前预警时间为 $10\text{ min}$ ;采用措施2时,大坝失稳提前预警时间为 $15\text{ min}$ 。根据经验公式<sup>[21]</sup>,计算预警时间为 $10\text{ min}$ 时,生命损失约为3000人。同理,可计算预警时间为 $15\text{ min}$ 时,洪水造成的下游生命损失约为2340人。

由于经济损失涉及面广,内容繁杂,全面精确计算困难较大,且水库库容不同对下游造成的损害不同。设水库正常水位运行时大坝失稳造成的下游经济损失为100亿,水库水位降低 $10\text{ m}$ 运行时大坝失稳造成的经济损失为80亿。

除去大坝失稳对下游造成的经济损失外,措施2、3和4本身也会带来直接经济损失或费用。以补强加固方案为例,大坝坝基加固工程投资合计近1500万元,另外由于大坝以发电为主,水库降低水位运行,势必会造成发电效益的损失。根据水库容积曲线得到水位降低 $10\text{ m}$ 时,库容减少 $V_w = 5.6 \times 10^8\text{ m}^3$ ,以每度电0.3元接入电网计算,当出力系数取0.7时,大坝补强加固期间,措施2造成的每年发电经济损失约为2945万元。

#### 4.3 基于生命质量指数的风险决策

首先要确定与生命质量指数有关的基本社会经济参数,取该枢纽当地的经济和社会发展水平为全国平均水平。根据中华人民共和国国家统计局统计数据<sup>[22]</sup>,2013年人口自然死亡率 $m$ 为0.716%,人均预期寿命为74.90岁,人均年国民生产总值为41908元。

根据文献<sup>[21]</sup>,结合中国国情,取 $C_{F8} = 0.19$ ,不考虑社会环境影响对效用弹性指数的影响,取 $q = 0.2$ 。寿命期望值的变化与具体措施的风险率有关,以措施2相对于措施1为例,计算死亡率的改变量 $dm = -2.84 \times 10^{-5}$ 。将该值代入下式计算得到寿命期望值的改变量

$$\frac{dE}{E} \approx -C_{F8} \frac{dm}{m} = 7.54 \times 10^{-4} \quad (14)$$

利用以上数据,可以对以上4种措施进行生命质量指数准则判断,其具体分析过程和数据见表3。从表3中可以看出:

a. 长效服役措施234的生命质量指数变化均为正,表明采取这3种措施中的任一种都比维持现状的措施要优越。

b. 措施2生命质量指数改变量为0.00089,提升幅度最大,措施3的生命质量指数提升比措施2稍小,措施4的生命质量指数提升相较措施23小得多,因此,大坝运行管理者应优先选择措施2或措施3来提升大坝服役性能。

表3 生命质量指数准则分析

长效服役措施	指 标									
	大坝失事下游经济损失/万元	大坝每年失事概率	下游每年预计经济损失/万元	管理措施本身经济成本/(万元·a <sup>-1</sup> )	管理措施合计损失/(万元·a <sup>-1</sup> )	失事死亡人数	dG	dG/G	dE/E	dL/L
措施1	100×10 <sup>4</sup>	6.0×10 <sup>-3</sup>	6000	0	6000	3000	130.4			
措施2	80×10 <sup>4</sup>	2.1×10 <sup>-3</sup>	1680	2945	4625	2340	100.5	7.1×10 <sup>-4</sup>	7.5×10 <sup>-4</sup>	0.00089
措施3	100×10 <sup>4</sup>	2.4×10 <sup>-3</sup>	2400	1500	3900	3000	84.8	1.1×10 <sup>-3</sup>	6.2×10 <sup>-4</sup>	0.00084
措施4	100×10 <sup>4</sup>	4.8×10 <sup>-4</sup>	480	9375	9855	3000	214.2	-2.0×10 <sup>-3</sup>	9.6×10 <sup>-4</sup>	0.00056

## 5 结 语

本文探讨了国内外提升大坝服役性能的可选措施,综合考虑大坝安全服役风险度和社会支付意愿,提出了生命质量指数相对变化量最大的大坝服役性能提升措施的决策模型。以存在一定坝体稳定风险的某混凝土重力坝为例,计算了该坝的可靠度和不同措施下的工程失稳风险率,估算了工程失事可能造成的生命损失和社会经济损失,最后,根据当时的社会 and 经济发展水平,计算了各措施的生命质量指数改变量。计算结果建议采取水库水位降低 10 m 运行或大坝补强加固的措施来提升大坝长期服役的性能,这一决策结果与专家想法和工程实际吻合。实例中,为了更清晰地说明问题,采用常量简化了一些随时间变化的参数。例如表 3 中各项数据的年际差异被忽视了。在实际应用时,应该按照年度列出大坝下一次全面检查前(一般在未来的 6~10 a 之间)的所有生命质量指数相对改变量,以此综合选择一个最优措施。

## 参考文献:

- [1] SU Huaizhi, WEN Zhiping, HU Jiang. Evaluation model for service life of dam based on time-varying risk probability [J]. Technological Science: Science China Series E, 2009, 52 (7): 1966-1973.
- [2] 吴中如, 顾冲时, 苏怀智, 等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 395-405. (WU Zhongru, GU Chongshi, SU Huaizhi, et al. Review and prospect of calculation analysis methods in hydro-structure engineering [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (5): 395-405. (in Chinese))
- [3] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册 [G]. 南京: 水利部大坝安全管理中心, 2015.
- [4] 张建云, 杨正华. 水库大坝病险和溃坝的研究与警示 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] JOHN H. Dam removal science and decision making [M]. Washington D. C.: The H John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, 2002.
- [6] WU Zhongru, XU Bo, GU Chongshi, et al. Comprehensive evaluation methods for dam service status [J]. Technological Science: Science China Series E, 2012, 42(11): 2300-2312.
- [7] 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 and Hydropower, 2009 (9): 101-104. (in Chinese))
- [8] 杨杰, 江德军, 郑成成, 等. 病险水库除险加固方案决策研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 213-219. (YANG Jie, JIANG Dejun, ZHENG Chengcheng, et al. Deciding reinforcement scheme for dangerous dam [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42 (11): 213-219. (in Chinese))
- [9] NATHWANI J S, LIND N C, PANDEY M D. Affordable safety by choice: the life quality method [M]. Waterloo: University of Waterloo, 1997.
- [10] PANDEY M D, NATHWANI J S. Life quality index for the estimation of societal willingness-to-pay for safety [J]. Structural Safety, 2004, 26(2): 181-199.
- [11] PANDEY M D, NATHWANI J S. Canada wide standard for particulate matter and ozone: cost-benefit analysis using a life quality index [J]. Risk Analysis, 2003, 23(1): 55-67.
- [12] NATHWANI J S, LIND N C, PANDEY M D. The LQI standard of practice: optimizing engineered safety with the life quality index [J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2008, 4(5): 327-334.
- [13] KATHARINA F, EDGAR V, MAURICIO S. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria [J]. Structural Safety, 2013, 44: 37-46.
- [14] GUO J. Recent achievements in hydraulic research in China [J]. Comprehensive Renewable Energy, 2012(6): 485-505.
- [15] 胡春宏, 陈建国, 郭庆超. 潼关高程的稳定降低与渭河下游河道综合治理 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 19-25. (HU Chunhong, CHEN Jianguo, GUO Qingchao. Stable lowering of Tongguan bed elevation and comprehensive regulation of the Lower Weihe River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(1): 19-25. (in Chinese))

(下转第 94 页)