

文章编号:1671-6833(2025)01-0059-08

# 考虑潜在溃坝的水库大坝运行成本和收益量化方法

葛巍<sup>1,2,3</sup>, 孙贺强<sup>1,2</sup>, 李永闯<sup>1,2,4</sup>, 景来红<sup>3</sup>, 李宗坤<sup>1,2</sup>, 王建有<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河实验室, 河南 郑州 450001; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 郑州航空港科创投资集团有限公司, 河南 郑州 451162)

**摘要:** 针对水库大坝逐渐老化、自身风险和运行成本不断增加的情况, 为了进一步明确水库大坝运行的经济性, 构建了一种考虑潜在溃坝损失作用下的水库大坝运行综合成本与综合收益量化模型。首先, 综合考虑大坝潜在溃坝的影响, 根据 ISM 理论明确了水库大坝运行成本与收益影响因素之间的相互作用关系, 确定了水库大坝运行综合成本与综合收益量化指标; 其次, 基于 DEMATEL 法分析了各因素之间的相互作用程度, 明确了各成本与收益指标之间相对重要程度; 最后, 结合技术经济学理论, 计算了潜在溃坝损失作用下的水库大坝运行综合成本和综合收益。将所提模型应用于国内某水库, 计算了该水库的运行综合成本和综合收益, 并对其经济性进行了分析, 结果表明: 在考虑潜在溃坝损失的情况下, 该水库运行综合成本为 743.62 万元, 综合收益为 10 911.83 万元, 收益成本比为 14.67, 运行综合收益远大于运行综合成本, 创收能力良好, 经济效益显著。

**关键词:** 水库大坝; 成本收益; 量化方法; 自身风险; 溃坝

**中图分类号:** TV698; F281

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.013

水库大坝是人类开发利用水资源最有效的手段之一, 是促进经济发展的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。随着时间的不断推移, 越来越多的大坝步入老龄化阶段, 安全性降低、运行成本大幅度增加等现象日益凸显。为了保证大坝运行的安全性和经济合理性, 科学量化分析其运行成本和收益极为关键。

在水库大坝日常运行管理体系中, 国内外学者对大坝不同情况下的投入和产出进行了研究和分析。成荣亮等<sup>[3]</sup>构建了成本与收益评价模型, 用于判断水库大坝除险加固或降等报废; 陈莉等<sup>[4]</sup>对大坝后期导流风险概率、发电收益以及下闸蓄水赶工成本进行了综合分析, 建立了导流方案多目标决策模型; Klein 等<sup>[5]</sup>对不同类型的小水电和用于评估水电项目的各种经济指标进行了分类, 并通过对多个国家小水电运行成本、收益的分析, 评估了小水电开发的经济性和可行性。上述研究成果主要偏重水库大坝运行管理中单项成本和收益或者管理措施实施过程的成本和收益分析, 没有对大坝整体运行投入

和产出进行评估。同时, 由于大坝溃坝具有很大的不确定性, 许多研究没有将大坝发生溃坝造成的巨大损失作为成本指标在大坝运行经济分析中进行考虑, 不能及时根据大坝自身风险的变化而做出满足经济合理性的管控措施。因此, 综合以上分析, 本文基于技术经济学理论与水库大坝风险管理理念相结合, 将水库大坝潜在溃坝所造成的损失作为成本之一进行考虑, 分析了潜在溃坝损失作用情况下水库大坝运行成本和收益各影响因素之间的作用关系和影响程度, 构建了水库大坝运行综合成本与综合收益量化模型, 评估了水库大坝运行的经济性, 为水库大坝运行管理提供科学的理论指导。

## 1 成本和收益影响因素作用关系分析

### 1.1 水库大坝运行成本和收益影响因素识别

本文基于人类社会、生态环境以及大坝自身三者之间的投入和产出活动, 并结合相关研究, 对水库大坝运行成本与收益的影响因素进行了确定。其

**收稿日期:** 2024-07-10; **修订日期:** 2024-09-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52079127, U2243244); 中国博士后科学基金资助项目(2023M731259); 河南省自然科学基金资助项目(232300421067)

**作者简介:** 葛巍(1990—), 男, 江苏沐阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利水电工程风险评价与管控研究, E-mail: gewei@zzu.edu.cn。

**引用本文:** 葛巍, 孙贺强, 李永闯, 等. 考虑潜在溃坝的水库大坝运行成本和收益量化方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 59-66. (GE W, SUN H Q, LI Y C, et al. Quantification method of operation cost and benefit of reservoir dam considering potential dam breach[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 59-66.)

中,产出活动的影响因素包括:防洪、发电、灌溉(农业供水)、供水、改善航运、改善生态环境、风险水平<sup>[6]</sup>;投入活动的影响因素包括:日常运行管理投入、除险加固投入、潜在溃坝损失、水资源管理水平、日常运行管理水平<sup>[7]</sup>、水资源开发利用技术、人力投入、物力投入、大坝设计标准<sup>[8]</sup>、区域经济发展情况、农业发展情况、人民生活水平、除险加固技术<sup>[9]</sup>、除险加固标准<sup>[10]</sup>、除险加固方案<sup>[10]</sup>。

### 1.2 基于 ISM 理论的影响因素作用关系分析

上述影响因素数量较多,且相互之间关系复杂。ISM(interpretative structural modeling)理论作为一种广泛应用的系统分析方法,可以将复杂的系统拆分为多个子系统,采用定性与定量分析相结合的方法,把因素之间的关系映射成有向图形,并将其关系科学分级,以最简洁的有向拓扑图形式展现<sup>[11]</sup>,其计算过程如下所示。

- 步骤 1 识别水库大坝运行成本与收益的影响因素。
- 步骤 2 确定各影响因素之间的关系。
- 步骤 3 构建邻接矩阵。邻接矩阵是在定性与定量相结合的基础上,以二元关系式表示因素之间的影响关系,如式(1)所示。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有影响;} \\ 0, S_i \text{ 对 } S_j \text{ 无影响。} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a_{ij}$  为邻接矩阵  $A$  中第  $i$  行第  $j$  列元素。

- 步骤 4 计算可达矩阵。根据布尔矩阵运算法则,可根据所构造的邻接矩阵计算得出可达矩阵:

$$N = (A + I)^{n-1}。 \quad (2)$$

$$A + I \neq (A + I)^2 \neq \cdots \neq (A + I)^{n-2} \neq (A + I)^{n-1} = (A + I)^n; \quad (3)$$

- 步骤 5 层次关系划分。根据所计算的可达矩阵,对各因素之间的层次关系进行划分,需要满足的条件为

$$R(S_i) = Q(S_i) \cap R(S_i)。 \quad (4)$$

式中: $R(S_i)$  为在可达矩阵  $N$  中矩阵元素数值为 1 所对应的列影响因素所构成的集合; $Q(S_i)$  为在可达矩阵  $N$  中矩阵元素数值为 1 所对应的行影响因素所构成的集合。首先,找出所有满足条件的影响因素  $S_i$ ,形成最高层因素集;划除最高层因素集中影响因素在可达矩阵中所对应的行和列,形成新的可达矩阵。然后重复上述步骤,找出第二层因素集。依次类推,直至最后一层。

## 2 综合成本与综合收益量化模型

### 2.1 基于 DEMATEL 法的权重计算

本文在各因素相互作用关系以及层级划分结果

的基础上,引入 DEMATEL(decision making trial and evaluation laboratory)法来对各因素之间的相互影响程度进行分析,从而求解出各因素在整个系统中的相对重要程度<sup>[12]</sup>。具体计算过程如下所示。

- 步骤 1 量化各影响因素之间的相互影响程度。根据工程实际状况并结合相关专家经验,以五点法(0 为无影响,1 为弱影响,2 为一般影响,3 为强影响,4 为较强影响)对各影响因素之间的相互影响程度进行定量分析<sup>[13]</sup>。

- 步骤 2 构造直接影响矩阵。依据各影响因素之间相互影响程度的定量判定结果构造直接影响矩阵,并按照式(5)将直接影响矩阵进行规范化处理。

$$P = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n q_{ij}; \quad (5)$$

$$U = \frac{Q}{P}。 \quad (6)$$

- 步骤 3 计算综合影响矩阵  $T$ 。综合影响矩阵  $T$  是依据所构造的直接影响矩阵计算而来的,其计算公式为

$$T = \lim_{n \rightarrow \infty} (U + U^2 + U^3 + \cdots + U^n)。 \quad (7)$$

- 步骤 4 计算各影响因素的权重。根据综合影响矩阵的计算结果,确定各因素之间的相对重要程度(权重):

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{i=1}^n t_{ij}}{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{i=1}^n t_{ij})}。 \quad (8)$$

- 步骤 5 计算水库大坝运行成本和收益各量化指标权重。为了表征其他层级因素对水库大坝运行成本指标和收益指标的影响作用,将其他层级因素的权重依据其作用路径向上传递至第一层,对各指标的权重进行修正,其计算公式如下所示:

$$w'_{l,i} = w_{l,i} + w_{l-1,k} \frac{w_{l,i}}{\sum_{i=1}^m w_{l,i}}。 \quad (9)$$

### 2.2 水库大坝各运行成本与运行收益量化

结合水库大坝风险管理理论,综合考虑大坝潜在破坏给社会和人民所带来的损失,本文将大坝运行过程中的成本主要分为了 3 个部分:日常运行管理成本、除险加固成本、潜在溃坝损失。此外,大坝在运行过程中也会产生巨大的收益。本文结合水库大坝的不同功能,将其所取得的收益分为防洪收益、发电收益、灌溉收益、供水收益、生态环境收益。以上成本以及收益各自对应的计算如下所示。

- (1) 日常运行管理成本。参考 SL72—2013《水

利建设项目经济评价规范》<sup>[14]</sup>,水库大坝的日常运行管理成本主要包括:工作人员年均薪资成本(主要指工作人员津贴及奖金,可按总工资的 62% 进行计算)、大坝运行所需物资成本(可按照大坝固定资产的 0.10% 进行计算)、大坝运行管理成本(可按照工作人员工资和福利费用的 1~2 倍进行计算)、大坝折旧成本(大型混凝土堤、坝、闸,土、土石混合等当地材料堤、坝,混凝土、沥青等防渗的土、土石等当地材料堤、坝折旧年限为 50 a)、其他成本(可按照防洪供水收益的 10% 进行计算)。

(2)除险加固成本。需结合工程自身情况,明确水库大坝存在的病险,并制定对应的除险加固方案,最终再根据除险加固方案实施过程中所投入的人力物力来对其成本进行计算。

(3)潜在溃坝损失。对潜在溃坝损失的计算主要包括两部分:溃坝概率和溃坝后果<sup>[11]</sup>。其具体的计算公式为

$$f(L,P)=(L_1+L_2)P。(10)$$

式中: $f(L,P)$ 为潜在溃坝损失; $P$ 为溃坝概率; $L_1$ 为直接损失; $L_2$ 为间接损失,采用折减系数来进行计算, $L_2=\lambda L_1$ 。

(4)防洪收益。防洪收益的计算一般采用频率法<sup>[15]</sup>,其计算公式为

$$S=\sum_0^{P_a}(P_{i+1}-P_i)\left(\frac{S_{i+1}+S_i}{2}\right)。(11)$$

式中: $S$ 为水库大坝多年平均防洪收益; $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 为不同洪水频率值; $S_i$ 、 $S_{i+1}$ 分别为频率  $P_i$ 、 $P_{i+1}$  所对应洪水造成的损失。

(5)发电收益。水库大坝发电收益可结合水库大坝向电网或用户所提供的有效电量以及当地的电价对大坝的发电收益进行计算,其计算公式为

$$B_e=E\cdot P_e。(12)$$

式中: $B_e$ 为水库大坝的发电收益; $E$ 为水库大坝向电网或用户所提供的有效电量; $P_e$ 为当地的电价。

(6)灌溉收益。水库大坝灌溉收益可采用不同作物灌溉前后产量的增加量与相对应的市场单价来进行计算,充分展现了大坝灌溉收益的发挥路径,其计算公式为

$$B_i=\varepsilon\left[\sum_{i=1}^nA_i(Y_i-Y_{oi})V_i\right]。(13)$$

式中: $B_i$ 为水库大坝的灌溉收益; $\varepsilon$ 为各作物的灌溉收益分摊系数; $A_i$ 为第  $i$  种作物的种植面积; $Y_i$ 为采取灌溉措施后第  $i$  种作物单位面积的产量; $Y_{oi}$ 为无灌溉时第  $i$  种作物单位面积的产量; $V_i$ 为第  $i$  种作物产品目前的市场价格。

(7)供水收益。水库大坝供水收益的计算主要采用的是影子水价法,根据供水量和用水水价进行计算,其计算公式为

$$B_w=W\cdot P_w。(14)$$

式中: $B_w$ 为水库大坝供水收益; $W$ 为水库大坝供水量; $P_w$ 为下游及周边地区的用水单价。

(8)生态环境收益。本文参照文献[16-17]的研究,通过水库对周围生态环境的供水量来计算其生态环境收益。计算公式为

$$B_E=(Q_{E1}+Q_{E2})E_{PE}。(15)$$

式中: $B_E$ 为水库大坝的生态环境收益; $E_{PE}$ 为水库大坝周围地区单方水生态价值; $Q_{E1}$ 、 $Q_{E2}$ 分别为生态需水量、环境需水量。

2.3 大坝综合成本与综合收益量化模型

技术经济学理论主要是对新老技术进行经济特性分析及评价,从经济的视角对技术的应用与研究进行分析决策<sup>[18]</sup>。按照技术经济学理论,技术生产或经济过程中,整个系统的经济效果包括 3 个方面:以生产资料消耗为代价的物化劳动部分  $T$ 、技术生产中的必要劳动部分  $V$  和技术生产中的剩余劳动部分  $m$ 。水库大坝运行管理的经济效果计算公式为

$$S=\frac{B}{C}=\frac{m}{T+V}。(16)$$

式中: $S$ 为系统工程的经济效果; $B$ 为系统工程的收益; $C$ 为系统工程的成本; $T$ 一般指固定资产的折旧费、材料费、动力费等; $V$ 一般指人员工资; $m$ 一般指收益。

根据水库大坝运行成本和收益影响因素作用关系分析结果,计算以生产资料消耗为代价的物化劳动部分  $T$ 、技术生产中的必要劳动部分  $V$  所对应的水库大坝运行综合成本  $C$ ,以及技术生产中的剩余劳动部分  $m$  所对应的水库大坝运行综合收益  $B$ ,计算公式为

$$\begin{cases} C=\sum_{i=1}^nC_i\omega_i; \\ B=\sum_{k=1}^nB_k\omega_k. \end{cases} (17)$$

式中: $C$ 为水库大坝运行综合成本; $B$ 为水库大坝运行综合收益; $C_i$ 为水库大坝第  $i$  项成本; $B_k$ 为水库大坝第  $k$  项收益; $\omega_i$ 为水库大坝第  $i$  项成本的权重; $\omega_k$ 为水库大坝第  $k$  项收益的权重。

3 实例应用

实例水库是一座位于河南省淮河流域的重点中型水库,从 1974 年至 2010 年经过多次除险加固,控



制流域面积为 113 km<sup>2</sup>,总库容为 6 897 万 m<sup>3</sup>,主要承担城市防洪、供水等任务。

3.1 水库大坝运行成本与收益量化指标确定

根据水库大坝运行实际情况,构建成本与收益各影响因素邻接矩阵,并计算可达矩阵,如图 1 所示。

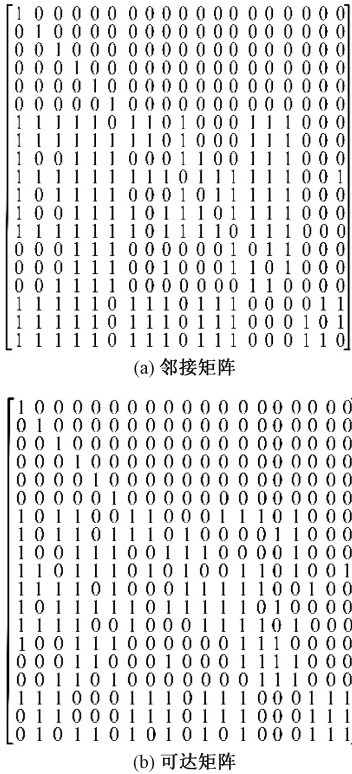


图 1 体现各因素之间关系的邻接矩阵和可达矩阵

Figure 1 Adjacency and reachability matrices reflecting the relationships between factors

确定各影响因素之间影响关系以及层级结构,结果如图 2 所示。其中, $S_0$  为水库大坝运行综合成本和综合收益、 $S_1$  为日常运行管理成本、 $S_2$  为除险加固成本、 $S_3$  为潜在溃坝损失、 $S_4$  为防洪收益、 $S_5$  为供水收益、 $S_6$  为生态环境收益、 $S_7$  为风险水平、 $S_8$  为大坝安全设计标准、 $S_9$  为水资源管理水平、 $S_{10}$  为日常运行管理水平、 $S_{11}$  为水资源开发利用水平、 $S_{12}$  为 人力投入情况、 $S_{13}$  为物力投入情况、 $S_{14}$  为区域经济发展情况、 $S_{15}$  为农业发展情况、 $S_{16}$  为人民生活水平、 $S_{17}$  为除险加固技术、 $S_{18}$  为除险加固标准、 $S_{19}$  为除险加固方案。图 1、图 2、图 3、表 1、表 2 中各符号代表的含义相同。

3.2 水库大坝运行成本与收益量化指标权重计算

结合工程运行实际状况,对各因素之间的相互作用程度进行分析判断,构造直接影响矩阵如图 3 所示。并根据式(8)计算各因素的相对重要程度(权重),最终计算结果如表 1 所示。

结合式(9)计算水库大坝运行成本与收益指标修正后的权重。同时,为明确大坝潜在破坏所造成的损失对其自身运行成本与收益的影响程度,计算了不考虑潜在溃坝损失情况下的水库大坝运行成本与收益量化指标权重,最终计算结果见表 2。

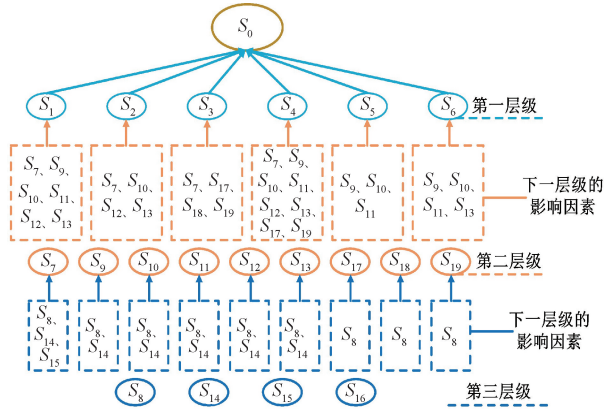


图 2 各因素之间的影响关系及层级

Figure 2 Influence relationships and hierarchical structure of various factors

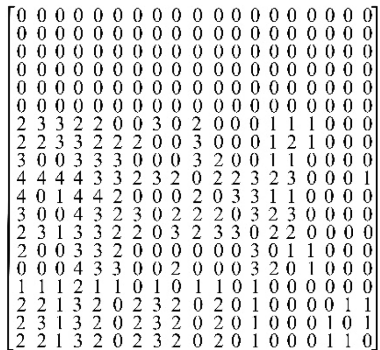


图 3 各因素之间的直接影响矩阵

Figure 3 Direct influence matrix between factors

表 1 水库大坝运行成本与收益各影响因素权重结果

Table 1 Results of each influencing factor weight of reservoir dam's operation costs and benefits

因素	权重	因素	权重	因素	权重
$S_1$	0.049	$S_8$	0.060	$S_{15}$	0.053
$S_2$	0.033	$S_9$	0.056	$S_{16}$	0.022
$S_3$	0.027	$S_{10}$	0.096	$S_{17}$	0.040
$S_4$	0.068	$S_{11}$	0.069	$S_{18}$	0.042
$S_5$	0.056	$S_{12}$	0.065	$S_{19}$	0.042
$S_6$	0.036	$S_{13}$	0.086		
$S_7$	0.055	$S_{14}$	0.045		

3.3 水库大坝运行成本与收益量化计算及分析

结合该水库大坝工程的实际运行状况,对水库大坝运行过程中所对应的各项成本和收益指标进行了计算。

(1)日常运行管理成本。结合工程实际运行情况,对该水库大坝日常运行管理成本进行了计算,结

果如表 3 所示。

表 2 水库大坝运行成本与收益指标修正后的权重

Table 2 Corrected weights of indicators for reservoir dam's operation costs and benefits

指标	权重	
	考虑潜在溃坝损失	不考虑潜在溃坝损失
$S_1$	0.171	0.192
$S_2$	0.134	0.165
$S_3$	0.156	
$S_4$	0.242	0.274
$S_5$	0.183	0.224
$S_6$	0.114	0.145

表 3 日常运行管理成本计算结果

Table 3 Calculation results of daily operation and management costs

指标	数值	指标	数值
固定资产/万元	75 000	工作人员/人	64
工作人员		大坝运行	
年均薪资/万元	627.20	所需物资/万元	150
运行管理/万元	672.20	大坝折旧/万元	1 442.30
其他成本/万元	880	总运行管理/万元	3 771.70

(2)除险加固成本。结合工程实际情况,该水库大坝的主坝、副坝、溢洪道以及部分机电设备存在问题,需要投入人力和物力对其进行除险。其中,主坝部分的防浪墙老化破裂、减压井存在沉淀物、廊道存在淤泥、排水沟老化破裂,需要投入 164.55 万元进行除险加固;副坝部分的下游坝排水沟淤积破坏、迎水坡马道破坏,需投入 163.69 万元;溢洪道部分的尾水渠挡墙老化严重、管理道路破坏,需要投入 187.28 万元;河道部分的溢洪道尾水渠淤积严重,需要投入 64.38 万元;部分机电设备腐蚀老化较为严重,需投入 67.92 万元。共需投入 647.82 万元对大坝进行除险加固。

(3)潜在溃坝损失。本文利用 HEC-RAS 对溃坝洪水演进进行了模拟,并将溃坝洪水模拟结果与研究区域的土地利用类型图层进行叠加分析,统计出溃坝洪水淹没的各类型土地面积以及对应不同水

深下的洪灾损失率分布,最终结果如图 4 所示,对应的淹没面积及损失结果如表 4、表 5 所示。

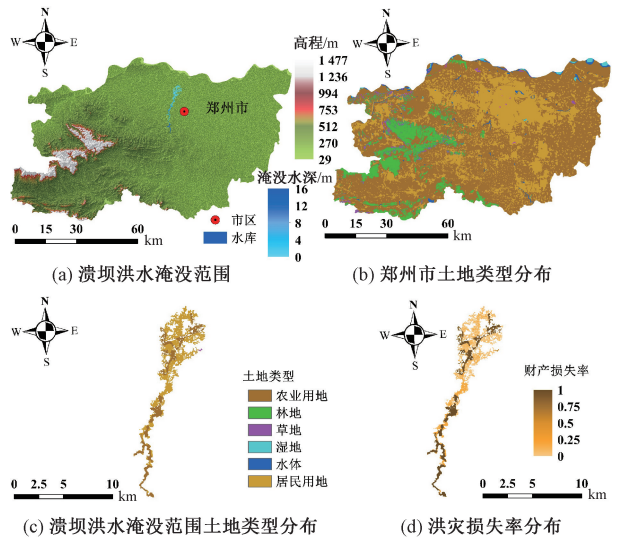


图 4 溃坝洪水淹没土地分布  
Figure 4 Distribution of land inundated by dam breach floods

表 4 不同水深下各土地类型淹没面积

Table 4 Area inundated for each land type at different water depths

水深/m	农业用地/m <sup>2</sup>	居民用地/m <sup>2</sup>	工商业用地/m <sup>2</sup>
0~0.5	3 030 496.05	606 092.10	2 424 396.84
0.5~1.0	3 315 613.35	6 631 226.69	2 652 490.68
1.0~3.0	10 570 405.60	21 140 811.19	8 456 324.48
≥3.0	7 000 189.96	14 000 379.91	5 600 151.98

表 5 淹没损失计算结果

Table 5 Calculation results of inundation losses

损失	数值	损失	数值
农业用地损失/万元	7 902.30	直接损失/万元	388 428.30
居民用地损失/万元	198 496.90	间接损失/万元	335 381.22
工商业损失/万元	182 029.10		

对于溃坝概率的计算,本文结合工程实际情况,采用舍选抽样法,利用 Monte-Carlo 方法进行了 200 000 次溃坝模拟(主要模拟的是洪水漫顶破坏),最终模拟结果如图 5 所示。潜在溃坝损失的最终计算结果如表 6 所示。

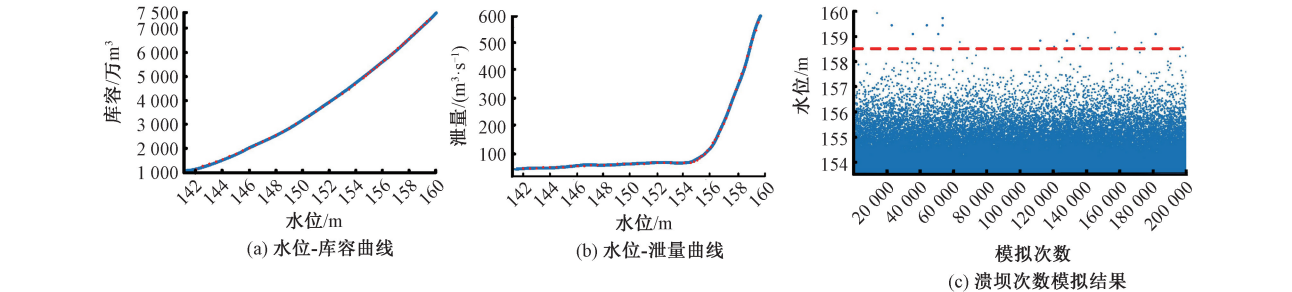


图 5 溃坝洪水淹没土地分布  
Figure 5 Distribution of land inundated by dam breach floods

表 6 潜在溃坝损失计算结果

Table 6 Calculation results of potential dam breach losses

指标	数值	指标	数值
模拟次数	200 000	溃坝总损失/万元	723 809. 52
破坏次数	21	潜在溃坝损失/万元	76
溃坝概率	$1. 05\times 10^{-4}$		

在水库大坝日常运行管理中,一般认为除险加固投入越大,对应的溃坝损失就越小。在实际工程中,水库大坝的除险加固措施主要是针对工程本身而言,可以提高其自身的安全性,降低自身破坏概率。因此,在本文计算过程中,对于大坝溃坝概率的计算,仅仅考虑了天然来水所造成的漫顶溃坝(因为有除险加固措施存在,认为大坝坝体结构是相对安全的)。同时,在各影响因素之间影响关系以及影响程度的计算中,也对除险加固和大坝潜在溃坝损失之间的关系进行了明确的分析,最终的权重计算结果中包含了对除险加固与潜在溃坝损失之间相互影响关系的考虑。在对溃坝后果的计算中,主要通过溃坝洪水演进模拟,与研究区域的土地利用类型图层、不同水深下的洪灾损失率以及各地块的经济发展情况相结合,对溃坝洪水造成的经济损失进行了计算。

(4)防洪收益。本文利用 HEC-RAS 模拟了无水库大坝时分别遭遇 50、100、5 000、10 000 a 一遇设计洪水时的淹没情况,对其淹没损失进行了计算。并结合式(11),计算了该水库大坝多年平均防洪收益,其结果如表 7 所示,可得多年平均防洪收益为 38 285. 37 万元。

表 7 多年平均防洪收益计算结果

Table 7 The calculation results of average multi-year flood control benefits

频率 $P$	损失/万元	$P_{i+1}-P_i$	$\frac{S_{i+1}+S_i}{2}$ /万元
1	0	0	0
0. 02	72 736. 51	0. 98	36 368. 26
0. 01	126 144. 50	0. 01	99 440. 51
0. 0002	210 106. 95	0. 009 8	168 125. 73
0. 0001	277 570. 57	0. 000 01	243 838. 76

(5)供水收益。该水库平均每年可向下游城市提供 2 000 万  $\text{m}^3$  的生活用水,按照单位综合水价可计算得出水库大坝供水收益为 8 800 万元。

(6)生态环境收益。该水库年均生态供水大约为 725 万  $\text{m}^3$ ,结合相关研究中该地区的单位生态环境供水资源价值,可得出该水库多年平均生态环境收益为 319 万元。

本文针对水库大坝运行成本和收益的量化,关注的是其运行经济性的分析。因此,在对水库大坝溃坝损失的计算过程中,主要计算了溃坝对下游地区所造成的经济损失。而溃坝对下游造成的人员伤亡情况,由于无法利用具体的金钱进行量化分析,在研究过程中,并未对其进行详细的计算。

根据计算得出水库大坝各项运行成本与收益,并结合表 2 中各量化指标的权重计算结果,分别计算两种情况下的水库大坝运行综合成本和综合收益,最终计算结果如表 8 所示。

表 8 水库大坝运行综合成本和收益及其比值

Table 8 Comprehensive cost and benefit of reservoir dam operation and their ratios			
是否考虑 潜在溃坝损失	综合成本/ 万元	综合收益/ 万元	收益成 本比
是	743. 62	10 911. 83	14. 67
否	831. 06	12 507. 65	15. 05

从表 8 中可以看出,在考虑潜在溃坝损失的情况下,水库大坝年均运行综合收益为 10 911. 83 万元,年均运行综合成本为 743. 62 万元,相对收益来说较低。收益成本比  $EBCR=14. 67>1$ ,说明水库大坝创收能力良好,经济上是可行的,经济效益显著。

在不考虑潜在溃坝损失的情况下,水库大坝年均运行收益相对上升;年均运行综合成本相对升高,收益成本比也有所提高,说明潜在溃坝损失对水库大坝运行成本与收益存在一定程度的影响。但相比于其他指标的计算值,大坝潜在溃坝损失的计算值较小(相差一到两个数量级),对于整体综合计算值(综合成本或收益成本比)的影响并不显著。这是因为在本文中,大坝潜在溃坝损失是按照溃坝概率和对应溃坝后果乘积的形式进行计算的(此时溃坝事件还未发生),相当于大坝的期望损失。在具体计算中,可能会出现溃坝概率小、溃坝后果严重,最终两者乘积较小的情况。然而,溃坝事件一旦发生,此时的大坝潜在溃坝损失就等于溃坝后果,其数值会远远大于其他成本指标和收益指标的计算值。同时,在对影响因素相互作用关系和作用程度进行分析中,潜在溃坝损失所占的比例相对较高,这反映了人们对于大坝安全问题的关注和重视。因此,水库大坝运行的安全性是其经济性的基础,在日常运行管理过程中,应从大坝自身出发,加强水库大坝的日常管理水平、除险加固水平,降低其自身溃坝概率;并在相对应地区制定应急管理预案,降低水库大坝溃坝的后果,减少水库大坝潜在溃坝损失,提高水库大坝运行的安全性和经济性。



4 结论

对大坝运行成本和收益进行科学全面的量化分析是合理确定水库大坝管理措施的客观需求。针对水库大坝逐步进入老龄化、自身风险和运行成本不断增加的问题,本文结合技术经济学理论和水库大坝风险管理理念,提出一种考虑潜在溃坝损失的水库大坝运行成本与收益量化模型,对水库大坝运行过程中的成本和收益进行了分析。该模型首先借助 ISM 理论对水库大坝运行成本和收益影响因素之间的影响关系进行了分析,筛选出了水库大坝运行成本与收益量化指标。基于 DEMATEL 法分析了水库大坝运行成本和收益影响因素之间的影响程度,计算各量化指标的权重。结合技术经济学理论,确定水库大坝运行成本和收益量化指标值,综合计算水库大坝运行综合成本和综合收益。并将该模型应用于国内某水库,对其运行综合成本与综合收益进行了分析计算。该模型旨在为水库大坝的日常运行管理提供理论指导,提高水库大坝运行的安全性和经济性。

参考文献:

[1] GE W, JIAO Y T, WU M M, et al. Estimating loss of life caused by dam breaches based on the simulation of floods routing and evacuation potential of population at risk[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128059.

[2] 葛巍,焦余铁,洪辛茜,等. 基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评价[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2021, 42(3): 8-12.

GE W, JIAO Y T, HONG X Q, et al. Risk assessment of life loss caused by dam breach based on AHP-BN method[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2021, 42(3): 8-12.

[3] 成荣亮,杨正华. 小型水库降等与报废成本效益评价模型研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(24): 101-105.

CHENG R L, YANG Z H. Study on cost-benefit evaluation model for downgrading and decommissioning of small reservoirs[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(24): 101-105.

[4] 陈莉,刘澈,徐珊,等. 考虑提前蓄水的高坝后期导流风险效益分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(11): 31-39.

CHEN L, LIU L, XU S, et al. Risk-benefit analysis of late stage diversion for high dams impounding water in advance[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(11): 31-39.

[5] KLEIN S J W, FOX E L B. A review of small hydropow-

er performance and cost[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 169: 112898.

[6] 盛金保,李宏恩,盛韬桢. 我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. *水利水运工程学报*, 2023(1): 1-15.

SHENG J B, LI H E, SHENG T Z. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(1): 1-15.

[7] 李宗坤,宋子元,葛巍,等. 基于模糊集理论的土石坝开裂破坏风险分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2020, 41(5): 55-59.

LI Z K, SONG Z Y, GE W, et al. Risk analysis of cracking failure of earth-rock dam based on fuzzy set theory[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2020, 41(5): 55-59.

[8] 程雄,林小滨,钟浩,等. 基于复杂度理论的水电站群标准化指标评价方法[J]. *水利学报*, 2022, 53(6): 697-711.

CHENG X, LIN X B, ZHONG H, et al. Standardization index evaluation method based on the complexity theory of hydropower station group[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(6): 697-711.

[9] 朱家胜,池昌静. 水库除险加固主要技术措施探析[J]. *黑龙江水利科技*, 2022, 50(1): 170-171.

ZHU J S, CHI C J. Analysis of main technical measures for reservoir reinforcement[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2022, 50(1): 170-171.

[10] 潘翔,沈振中,甘磊,等. 大坝除险加固效果评价的时效性指标量化模型[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(3): 155-161.

PAN X, SHEN Z Z, GAN L, et al. Quantitative model of time-efficient indexes for evaluation of reinforcement effect of dam[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(3): 155-161.

[11] 董灵莉,丰景春,杨志祥,等. BIM 在水利工程中应用的影响因素研究[J]. *水利经济*, 2021, 39(6): 10-15, 77-78.

DONG L L, FENG J C, YANG Z X, et al. Influencing factors for application of BIM in hydraulic engineering[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(6): 10-15, 77-78.

[12] 孙亚翡,王涛,路锦枝,等. 基于 BP-DEMATEL 算法的冰情预报因子敏感性分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(9): 1083-1091.

SUN Y F, WANG T, LU J Z, et al. Sensitivity analysis of BP-DEMATEL model to control parameters of ice processes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(9): 1083-1091.

[13] 谭寅寅,姚凯文,张丹. 基于 DEMATEL-ISM 法的水

库移民安置投资控制研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(11): 190-195.

TAN Y Y, YAO K W, ZHANG D. Research on the investment control of reservoir migration project based on DEMATEL-ISM method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(11): 190-195.

[14] 中华人民共和国水利部. 水利建设项目经济评价规范: SL 72—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulation for economic evaluation of water conservancy construction projects: SL 72—2013[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.

[15] 王艳艳, 王静, 胡昌伟, 等. 太湖流域应对特大洪水防洪工程效益模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 885-896.

WANG Y Y, WANG J, HU C W, et al. Benefit simulation of flood control project in Taihu Lake Basin under extreme floods[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 885-896.

[16] WU Z N, ZHANG X W, GUO X, et al. Emergy evaluation of ecological and economic value of water and soil resources in residential and industrial land based on energy analysis[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109692.

[17] 姜峰. 观音阁水库生态供水效益量化与价值评估[J]. 水利技术监督, 2023, 31(8): 47-49, 54.

JIANG F. The method and application of quantification and value evaluation of ecological water supply benefits of Guanying Reservoir[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, 31(8): 47-49, 54.

[18] 李林军, 邱国玉. 城市水资源开发利用的能源消耗及其经济学分析: 以深圳市为例[J]. 生态经济, 2023, 39(12): 95-101.

LI L J, QIU G Y. Analysis on energy consumption and economics of urban water resource development and utilization: a case study in Shenzhen[J]. Ecological Economy, 2023, 39(12): 95-101.

Quantification Method of Operation Cost and Benefit of Reservoir Dam  
Considering Potential Dam Breach

GE Wei<sup>1, 2, 3</sup>, SUN Heqiang<sup>1, 2</sup>, LI Yongchuang<sup>1, 2, 4</sup>, JING Laihong<sup>3</sup>, LI Zongkun<sup>1, 2</sup>, WANG Jianyou<sup>1, 2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 4. Zhengzhou Airport Economy Zone Science and Technology Innovation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 451162, China)

**Abstract:** For the problems of gradual aging of reservoir dams and increasing risks and operation costs, a model to quantify the comprehensive costs and benefits of reservoir dam operation considering potential dam breach losses was constructed. Firstly, the impact of potential dam breach was considered comprehensively, the interaction relationship between the cost and benefit influencing factors of reservoir dam operation according to the ISM theory was clarified, and the quantitative indicators of the comprehensive cost and benefit of reservoir dam operation were determined. Secondly, the degree of interaction between the factors was analyzed based on the DEMATEL method, which clarified the relative importance between each cost and benefit indicator. Finally, the comprehensive cost and benefit of reservoir dam operation with potential dam breach losses were calculated in combination with the technoeconomic theory. The model was applied to a reservoir in China. The comprehensive cost and benefit of the reservoir operation were calculated, and its economic benefits were analyzed. The results showed that the comprehensive cost of operating this reservoir was 7 436 200 Yuan while considering of potential dam breach losses, the comprehensive benefit was 109 118 300 Yuan, and the benefit-cost ratio was 14. 67. The comprehensive benefit of operation was much larger than the comprehensive cost of operation, the revenue-generating capacity was good, and the economic benefits were significant.

**Keywords:** reservoir dam; cost benefit; quantitative method; own risk; dam breach