

文章编号: 1671-6833(2021)03-0008-05

## 基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评价

葛巍<sup>1,2</sup>, 焦余铁<sup>1</sup>, 洪辛茜<sup>3</sup>, 段志昌<sup>1</sup>, 李宗坤<sup>1</sup>, 高卫星<sup>4</sup>

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 代尔夫特理工大学 技术、政策和管理学院, 荷兰 代尔夫特 2628 BX; 3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 4. 郑州大学 政治与公共管理学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对影响溃坝生命损失因素多, 而历史统计资料相对较少导致溃坝生命损失评价的准确性和实用性难以协同实现的问题, 提出一种适用于对大量大坝生命损失进行评价的模型。选取溃坝洪水严重性程度、警报时间、溃坝发生时间、风险人口、溃坝理解程度、青壮年比例、建筑物质量、救援能力 8 个指标, 构建溃坝生命损失指标体系; 按照相关标准和准则划分指标等级, 运用 AHP-BN 法综合考虑权重与概率影响, 构建出溃坝生命损失评价模型。将模型应用于 3 座已溃大坝实例, 结果表明: 李家咀、洞口庙和史家沟水库的评价风险值大小分别为 0.626、0.594 和 0.522, 风险大小与实际生命损失情况一致, 验证了模型的有效性。基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评价具有较好的理论意义和工程应用价值。

**关键词:** 溃坝; 生命损失; AHP-BN; 评价模型; 风险评价

中图分类号: TV21; X954

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2021.03.002

### 0 引言

作为一种低概率高损失事件, 水库大坝一旦溃决, 不仅影响水库自身的功能和效益, 而且可能会导致巨大的生命损失, 给下游居民带来无法消除的精神痛苦和心理恐慌, 造成社会难以承受的不良影响。2018 年老挝 Xe-Pian Xe-Namnoy 水电站溃坝, 造成 35 人死亡<sup>[1]</sup>; 2018 年新疆射月沟水库溃坝, 造成 20 人死亡<sup>[2]</sup>。因此, 溃坝生命损失风险评价一直为水库大坝风险管理领域所关注。

Brown 等<sup>[3]</sup>应用经验统计的方法对 24 座大坝溃坝生命损失的历史数据进行分析, 建立了一个简单的溃坝生命损失经验估算公式; Dekay 等<sup>[4]</sup>对其改进, 得到了一个包含风险人口、警报时间、洪水严重程度与生命损失关系的公式; 周克发等<sup>[5]</sup>根据历史数据, 提出更符合中国实际的溃坝生命损失评价模型; Peng 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于贝叶斯网络并结合蒙特卡罗算法, 考虑了更多影

响生命损失的因素与各因素之间内在关系的溃坝生命损失评价模型 (HURAM)。此类结合致灾机理分析的经验模型使用简单, 但由于中国溃坝历史资料缺乏, 在进行资料回归分析时不得不面临小样本的问题, 限制了其准确性。

王志军等<sup>[7]</sup>把地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术引入到溃坝生命损失评估中; 杨胜梅等<sup>[8]</sup>利用空间信息技术对溃坝洪灾特征参数进行估算, 对溃坝生命损失进行评估; 石振明等<sup>[9]</sup>采用地理信息工具快速获取坝址和上下游河道三维地形信息, 构建了堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法。此类结合计算机模拟和 GIS 的区域损失叠加分析法计算精度高, 但是数据采集工程量巨大且操作过于复杂, 实际应用中存在很大难度, 不适合对大量大坝进行生命损失风险评价<sup>[10]</sup>。

层次分析-贝叶斯网络法 (analytic hierarchy process-Bayesian network, AHP-BN) 将层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和贝叶斯网

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52079127, 51679222); 国家大坝安全工程技术研究中心开放基金项目 (CX2020B01)

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

通信作者: 李宗坤 (1961—), 男, 河南邓州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利工程风险评价与管理研究, E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

络(Bayesian network, BN)相结合,不仅能解决评价中的不确定性问题,而且充分考虑要素权重和要素发生概率,减少评价主观性,从而得出客观准确的评价结果<sup>[11-12]</sup>。

## 1 溃坝生命损失评价指标体系的构建

溃坝生命损失模型涉及的评价指标繁多且复杂:既有定性指标,又有定量指标,部分指标受到工程因素和人为因素的共同作用,因此科学合理地选择评价指标应遵循以下原则<sup>[13]</sup>:

(1) 科学性。选取的指标应能对溃坝生命损失进行客观准确的描述。

(2) 系统性。选取的指标能在各个部分形成一个有机的整体,且具有一定的层次性。

(3) 典型性。选取的指标应具有代表性。例如,洪水的危险性与洪水严重性程度、流量、淹没范围与淹没历时等因素有关,目前国内外已有研究成果认为洪水严重性程度更具有代表性<sup>[14]</sup>,因此指标应选取洪水严重性程度。

(4) 可操作性。选取的指标的数据应易于收集且适于分析计算。例如溃坝期间的天气是无法预测的,也很难确定其概率,现有的研究成果也指出该因素的重要性偏低,所以这类指标暂不予考虑。

(5) 定量与定性相结合。充分考虑指标是否易于量化,采用定量与定性相结合的原则可以保证评价结果的科学性。

根据以上指标选取原则,选取溃坝洪水严重性程度、风险人口、警报时间、溃坝理解程度、青壮年比例、溃坝发生时间、救援能力、建筑物质量 8 个指标。溃坝洪水造成生命损失是致灾因子、孕灾环境和承载体的综合体现<sup>[15]</sup>,因此可从危险性、易损性和防御性 3 个角度将指标进行分类,从而构建溃坝生命损失评价指标体系,如图 1 所示。

## 2 基于 AHP-BN 法的生命损失评价模型

### 2.1 实施步骤

#### 2.1.1 AHP 计算权重

AHP 是一种定性和定量相结合,系统化、层次化的分析方法,在处理复杂的决策问题上具有实用性和有效性<sup>[16]</sup>。利用层次分析法计算图 1 模型各指标权重,大致步骤如下:①构造判断矩阵;②层次单排序及一致性检验;③层次总排序及一致性检验。

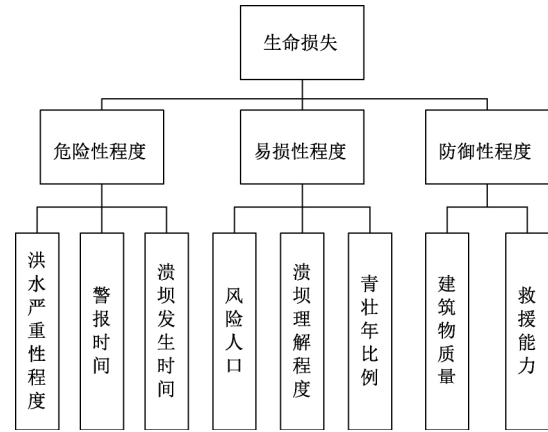


图 1 溃坝生命损失评价指标体系

Figure 1 Evaluation index system for life loss evaluation of dam breach

#### 2.1.2 BN 计算概率

BN 又称信度网络,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型之一,是一种概率图模型,由 Pear 首先提出<sup>[17]</sup>。贝叶斯网络由有向无环图(directed acyclic graph, DAG)和条件概率表集(condition probability table, CPT)组成,如图 2 所示,其中节点 X、Y 为节点 Z 的父节点,节点 Z 为节点 X、Y 的子节点,它们之间用有向线段连接。

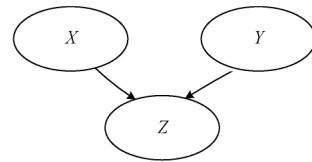


图 2 贝叶斯网络示意图

Figure 2 Schematic diagram of Bayesian network

贝叶斯网络的理论依据是贝叶斯公式和全概率公式,如式(1)和式(2)所示:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}; \quad (1)$$

$$P(A) = \sum_i P(A|B_i)P(B_i)。 \quad (2)$$

式中:  $P(B)$  为事件 B 发生的概率,为先验概率,即在完全不考虑其他因素情况下事件 B 的概率;  $P(B|A)$  表示事件 A 已发生,事件 A 发生是由事件 B 发生引起的概率,为后验概率;  $P(A|B)$  为似然率;  $i$  为事件个数。

由式(1)和式(2)可知,通过给定所有节点的先验概率及每个节点的条件概率表集,即可得到包含所有节点的联合概率分布,如式(3)所示:

$$P(A, B, C) = P(C|A, B)P(A, B) = P(C|A, B)P(A)P(B)。 \quad (3)$$

### 2.1.3 计算风险值

利用 AHP 计算出指标的权重  $W$ , BN 计算出指标的概率  $P$  根据式(4)可计算出溃坝生命损失风险值  $R$ <sup>[18-19]</sup>:

$$R = W(A) \times P(A) + W(B) \times P(B) + W(C) \times P(C)。(4)$$

## 2.2 专家评分标准

为便于专家参考和打分,保证评价结果的科学性,需明确专家打分标准。

### 2.2.1 权重打分标准

利用 AHP 构建判断矩阵计算指标权重时,打分可根据文献[20]中具有较好认可度的 9 级赋值法,如表 1 所示。

表 1  $a_{ij}$ 取值及意义

$a_{ij}$ 取值	$a_{ij}$ 意义
1	$i$ 与 $j$ 一样重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 极其重要
2,4,6,8	上述中间状态的对应取值

### 2.2.2 概率打分标准

贝叶斯网络的条件概率可结合联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)机构提出的概率定性表述,划分为 7 级<sup>[21]</sup>,如表 2 所示。

表 2 概率定性表述

概率范围	表述
(0, 1%]	几乎不可能发生
(1%, 10%]	很小可能发生
(10%, 33%]	较小可能发生
(33%, 66%]	中等可能发生
(66%, 90%]	较大可能发生
(90%, 99%]	很大可能发生
(99%, 100%)	肯定发生

一些指标(例如警报时间)其先验概率打分标准值可根据相应的阈值进行插值计算,一些定性的指标打分标准(例如溃坝理解程度)可在专家经验和工程实际的基础上人工确定。根据相关资料<sup>[22]</sup>将洪水严重性程度、风险人口、警报时间、青壮年比例、救援能力、建筑物质量划分为 3 个等级,相应打分参考见表 3;将溃坝理解程度、溃坝发生时间划分为 2 个等级,相应打分参考见表 4。

表 3 三等级专家打分参考值

指标	专家打分参考值		
	概率为 0~0.33	概率为 0.33~0.66	概率为 0.66~1.00
洪水严重性程度/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	低[0, 4.6)	中[4.6, 12.0)	高[12.0, $+\infty$ )
风险人口/人	少[1, $10^3$ )	中[ $10^3$ , $10^4$ )	多[ $10^4$ , $+\infty$ )
警报时间/h	充分警报[1.00, $+\infty$ )	部分警报[0.25, 1.00)	无警报[0, 0.25)
青壮年比例	高[0.66, 1.00)	中[0.33, 0.66)	低[0, 0.33)
救援能力	高	中	低
建筑物质量	强	一般	弱

表 4 二等级专家打分参考值

指标	专家打分参考值	
	概率为 0~0.5	概率为 0.5~1
溃坝理解程度	明确	模糊
溃坝发生时间	白天	夜晚

表 5 各级指标权重计算结果

1 级子指标	1 级子指标权重	2 级子指标	2 级子指标权重
危险性程度	0.40	洪水严重性程度	0.53
		警报时间	0.36
		溃坝发生时间	0.11
易损性程度	0.40	风险人口	0.53
		溃坝理解程度	0.36
		青壮年比例	0.11
防御性程度	0.20	建筑物质量	0.65
		救援能力	0.35

## 3 实例验证

将评价模型应用于国内 3 座已溃大坝中,使用层次分析法对各级指标的权重赋值见表 5。

根据 3 座大坝的资料对贝叶斯网络先验概率进行赋值,3 座大坝溃坝相关信息见表 6<sup>[22]</sup>。

表6 大坝基本情况

Table 6 Basic condition of dams

溃坝名称	洪水严重性程度	警报时间	溃坝发生时间	风险人口	溃坝理解程度	青壮年比例	建筑物质量	救援能力
洞口庙	低	无警报	夜晚	中	模糊	中	强	低
李家咀	中	无警报	夜晚	中	模糊	中	强	低
史家沟	中	部分警报	夜晚	少	模糊	中	强	低

根据表2对条件概率值打分拟定,使用贝叶斯网络,最终计算出每座大坝2级指标的概率值,结果见表7。

表7 2级指标概率值计算结果

Table 7 Probability calculation results of indicators at secondary level

溃坝名称	概率值		
	危险性程度	易损性程度	防御性程度
洞口庙	0.54	0.56	0.77
李家咀	0.62	0.56	0.77
史家沟	0.60	0.32	0.77

根据式(4)运用 AHP-BN 法,计算出大坝的风险值  $R$ ,结果见表8。

表8 风险值计算结果

Table 8 Calculation results of risk value

溃坝名称	$R_i$			$R$
	危险性	易损性	防御性	
洞口庙	0.216	0.224	0.154	0.594
李家咀	0.248	0.224	0.154	0.626
史家沟	0.240	0.128	0.154	0.522

3座大坝实际生命损失情况为:李家咀516人、洞口庙186人和史家沟81人。根据表8计算结果可知,3座大坝的溃坝生命损失风险值  $R$  从大到小依次为李家咀、洞口庙和史家沟,与实际生命损失大小排序相一致,验证了方法的可行性。

#### 4 结论

溃坝生命损失评价是有效判定水库大坝风险水平的重要方面。针对现有溃坝生命损失评价方法不适用于大量大坝的溃坝后果评价的状况,提出一种适用于大量大坝生命损失风险评价的模型。利用 AHP-BN 法不仅能解决不确定问题,而且能综合考虑要素权重和要素发生概率,减少评价主观性,对溃坝生命损失风险进行评价。将模型应用于实例,3座大坝风险值从大到小依次为李家咀、洞口庙和史家沟,结果与实际情况相一致,验证了模型良好的有效性,可为预案编制和针对性应急措施的制定提供借鉴和指导,具有一定的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 徐泽平. 老挝桑片-桑南内水电站溃坝事件初步分析与思考[J]. 水利水电快报, 2018, 39(8): 6-10.
- [2] GE W, JIAO Y T, SUN H Q, et al. A method for fast evaluation of potential consequences of dam breach [J]. Water, 2019, 11(11): 2224.
- [3] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam failure [J]. JAWRA journal of the American water resources association, 1988, 24(6): 1303-1309.
- [4] 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.
- [5] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 145-149.
- [6] PENG M, ZHANG L M. Analysis of human risks due to dam-break floods: part 1: a new model based on Bayesian networks [J]. Natural hazards, 2012, 64(1): 903-933.
- [7] 王志军, 张治军, 李子阳. GIS 支持下的溃坝损失评估方法研究 [J]. 水力发电, 2008, 34(8): 75-77 87.
- [8] 杨胜梅, 黄艳芳, 李申亭, 等. 基于空间信息技术的溃坝洪灾损失定量评估研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 105-108.
- [9] 石振明, 熊永峰, 彭铭, 等. 堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法: 以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例 [J]. 水利学报, 2016, 47(6): 742-751.
- [10] 葛巍, 焦余铁, 李宗坤, 等. 溃坝风险后果研究现状与发展趋势 [J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 143-151.
- [11] 蒲英霞, 邓冬梅, 赵心怡. 基于 AHP-BN 的四川省新型城镇化水平研究 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 77-83 99.
- [12] 刘健, 赵刚, 郑运鹏. 基于 AHP-贝叶斯网络的信息安全风险态势分析模型 [J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(3): 68-74.
- [13] LI W, LI Z K, GE W, et al. Risk evaluation model of life loss caused by dam-break flood and its application [J]. Water, 2019, 11(7): 1359.
- [14] 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.
- [15] LI Z K, LI W, GE W. Weight analysis of influencing factors of dam break risk consequences [J]. Natural hazards and earth system sciences, 2018, 18(12): 3355-3362.
- [16] 王正阳, 詹智民, 罗宾, 等. 基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(2): 43-47.
- [17] LI Z K, WANG T, GE W, et al. Risk analysis of earth-rock dam breach based on dynamic Bayesian network [J]. Water, 2019, 11(11): 2305.
- [18] 刘厂, 赵俊翔, 胡海. 基于双贝叶斯估计的动态威胁运动状态估计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 55-60.
- [19] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于 AHP-BN 的陕西经济可持续发展水资源保障研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 6-13.
- [20] 李宗坤, 王特, 葛巍, 等. 基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 62-66.
- [21] 葛巍, 李宗坤, 王文姣, 等. 基于 WBS-RBS 和 AHP 的土石坝施工期风险评估[J]. 人民黄河, 2013, 35(6): 121-123.
- [22] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.

## Risk Assessment of Life Loss Caused by Dam Breach Based on AHP-BN Method

GE Wei<sup>1,2</sup>, JIAO Yutie<sup>1</sup>, HONG Xinqian<sup>3</sup>, DUAN Zhichang<sup>1</sup>, LI Zongkun<sup>1</sup>, GAO Weixing<sup>4</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Faculty of Technology, Policy and Management, Delft University of Technology, Delft 2628 BX, the Netherlands; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 4. School of Political Science and Public Administration, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The accuracy and practicability of life loss assessment of dam break can not be realized synergistically due to many factors affecting the life loss of dam break and relatively few historical statistics. A model suitable for the evaluation of life loss of dam breach is proposed. Eight indexes, i.e., severity of dam break flood, alarm time, occurrence time of dam break, risk population, understanding degree of dam break, proportion of young and middle-aged people, building quality and rescue capacity, are selected to build a dam break life loss index system. The index grade is divided according to the relevant standards and criteria. AHP-BN method is used to comprehensively consider the influence of weight and probability, calculate the risk value of life loss, and build a dam break life loss assessment model. The application of the model to an example shows that the risk values of life loss of the three dams are ranked in the order of Lijiazui Reservoir (0.626), Dongkoumiao Reservoir (0.594) and Shijiagou Reservoir (0.522). The evaluation results are consistent with the actual situation, which verifies the validity and practical value in engineering of this model.

**Key words:** dam breach; life loss; AHP-BN; evaluation model; risk assessment