

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.010

基于组合赋权-云模型的溃坝生命损失风险评价

程 井¹, 向思瑶¹, 周 伟², 何子瑶³

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 武汉大学水利水电学院; 3. 南方电网储能股份有限公司)

摘要: 针对传统溃坝生命损失评估中层次分析法赋权主观性强、生命损失风险时空分布研究不足以及风险指标具有较大模糊性和随机性的问题,提出了一种基于组合赋权-云模型的溃坝生命损失风险评价方法。该方法综合考虑各类影响因素,构建溃坝生命损失评价指标等级划分标准,基于溃坝洪水演进结果构建下游淹没区的单元人口分布模型,综合 G1 法-熵权法组合赋权方法确定的指标权重及云模型得到的各单元风险隶属度,实现溃坝过程中不同时空单元的风险动态评估,通过计算生命损失值判定水库溃坝的总体生命损失风险等级。实例验证结果表明:G1 法-熵权法组合赋权方法融合了洪水演进过程中的数据变化,能有效平衡溃坝生命损失风险评价中相关指标的主客观权重;组合赋权-云模型方法能有效处理风险评估过程中的随机性和模糊性问题,实现溃坝过程的动态风险评估,更符合洪水演进的实际过程,能更准确地反映溃坝初期洪水对受灾群体风险的影响。

关键词: 溃坝; 生命损失; 风险评价; 组合赋权; 云模型

Risk assessment of life loss in dam breach based on combined weighting-cloud model

Cheng Jing¹, Xiang Siyao¹, Zhou Wei², He Ziyao³

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University;
3. China Southern Power Grid Energy Storage Co., Ltd.)

Abstract: To address the problems of strong subjectivity in weighting by the analytic hierarchy process and insufficient research on the spatiotemporal distribution of life loss risks in traditional dam breach life loss assessment, as well as the high fuzziness and randomness of risk indicators, a risk assessment method for dam breach life loss based on a combined weighting-cloud model was proposed. This method comprehensively considered various influencing factors, established a grading standard for dam breach life loss assessment indicators, and constructed a unit population distribution model for the downstream flooded area based on dam breach flood routing results. By integrating the indicator weights determined by the combined G1-entropy weight method with the risk membership degree of each unit obtained from the cloud model, dynamic risk assessment of different spatiotemporal units during the dam breach process was achieved. The overall life loss risk level of the reservoir dam breach was determined by calculating the life loss value. The case study results demonstrate that the combined G1-entropy weight method integrates data changes during flood routing and effectively balances the subjective and objective weights of relevant indicators in dam breach life loss risk assessment; the combined weighting-cloud model method can effectively handle the randomness and fuzziness issues in the risk assessment process, achieve dynamic risk assessment of the dam breach process, better conform to the actual flood routing process, and more accurately reflect the impact of the flood on the affected population during the initial stage of the dam breach.

Key words: dam breach; life loss; risk assessment; combined weighting; cloud model

水库大坝一旦溃决将产生严重后果^[1],溃坝生命损失是指因大坝溃决所引发的洪水及其次生灾害所造成的人口损失,是大坝溃决后果中最严重的损失形式。因此,开展溃坝生命损失风险评价具有重要意义,不仅有助于水库的安全管理,还能为应急预案的制定提供科学依据^[2]。

国外对溃坝生命损失的研究较早^[3-5],但研究成果是基于国外溃坝资料统计得到的,不适用于我国的大坝情况。近年来,国内学者也开展了大量关于溃坝生命损失的研究:周克发等^[6]依据我国的溃坝资料,研究了各类影响因素对风险人口死亡率的影响程度,构建了符合我国国情的溃坝生命损失评价模型;Li 等^[7]通

过专家打分法和云改进熵权法,建立了溃坝风险影响因子权重计算模型;葛巍等^[8]将层次分析法与贝叶斯网络相结合,从指标权重和概率的角度评价溃坝生命损失风险。这些方法充分考虑了生命损失的影响因素,但它们在指标权重上大多依赖主观赋权,忽略了指标信息的客观性;同时,许多因素具有明显的空间变异性,其时空分布特征直接影响风险的时空演变规律,而目前关于影响因素时空变化规律的研究相对较少。

溃坝生命损失影响因素的不确定性对评价结果的影响较为突出,为此 Zhu 等^[9]通过改进差分进化算法,提出了一种基于模糊聚类迭代法的溃坝生命损失评价模型;Ge 等^[10]引入区间理论分析生命损失,通过多个溃坝试验验证了方法的准确性;Yin 等^[11]运用模糊理论对生命损失的影响因素进行了量化,结合随机森林模型提出了一种新算法。云模型是一种以模糊数学与概率论为基础的数学模型,由李德毅等^[12]提出,目前已在风险评价^[13]、安全管理^[14-15]、智能算法^[16]等多个领域得到广泛应用,在处理模糊性和随机性方面表现优异。

本文基于洪水演进过程,采用组合赋权法对风险指标进行主客观动态赋权,利用云模型描述风险评价过程中的模糊性和随机性,实现指标权重的动态化,揭示下游风险的时空分布规律,最终通过计算生命损失值判定水库溃坝生命损失的风险等级。

1 研究方法

1.1 组合赋权-云模型评价模型

1.1.1 组合赋权

1.1.1.1 G1 法确定主客观权重

G1 法又称序关系分析法,是一种改进的层次分析法,它通过对评价指标进行排序并比较相邻指标的相对重要性确定权重,可有效避免层次分析法中复杂的判断矩阵一致性检验工作^[17]。具体计算步骤:①确定序关系,将评价指标 $X_j(j=1,2,\cdots,m;m$ 为评价指标的总数)按重要性从高到低进行排序($X_1>X_2>\cdots>X_m$);②邀请专家对相邻指标的重要性程度进行比较,指标重要性程度赋值见表 1;③计算最不重要指标的权重,并递推计算其他指标的权重:

表 1 r_j 赋值及其定性描述
Table 1 Assignment of r_j and its qualitative description

r_j 赋值	定性描述
1.0	指标 X_{j-1} 与指标 X_j 具有相同的重要性
1.2	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 稍微重要
1.4	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 明显重要
1.6	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 强烈重要
1.8	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 极端重要

$$w'_j = \left(1 + \sum_{j=2}^m \prod_{p=j}^m r_p\right)^{-1} \tag{1}$$

$$w'_{j-1} = r_j w'_j \tag{2}$$

式中: w'_j 为指标 X_j 的主观权重; r_j 为指标 X_{j-1} 与指标 X_j 的重要性程度之比。

1.1.1.2 熵权法确定客观权重

熵权法是依据指标变异性大小客观确定权重的方法。该方法通过计算各指标信息熵量化其离散程度,进而确定权重,可有效避免主观赋权带来的偏差^[18-19]。核心思想为:指标离散程度越大,数据差异越显著,所提供信息量越多,对应熵值越小,权重越高。计算步骤如下:①对原始数据集进行极差标准化处理;②根据式(3)(4)计算各指标的比重和熵值;③根据熵值计算各指标的客观权重(式(5))。

$$p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \tag{3}$$

$$e_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{4}$$

$$w''_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \tag{5}$$

式中: p_{ij} 为指标 X_j 下评价对象 i 的比重; x'_{ij} 为评价对象 i 的指标 X_j 标准化处理后的数据; n 为评价对象总数; e_j 为指标 X_j 的熵值, $e_j \in [0,1]$; w''_j 为指标 X_j 的客观权重。

1.1.1.3 组合赋权

将计算得到的主观权重和客观权重进行线性组合:

$$w_j = \lambda w'_j + (1 - \lambda) w''_j \tag{6}$$

式中: w_j 为指标 X_j 的组合权重; λ 为主观权重系数,建议取值范围为 0.5~0.8,本文取 $\lambda=0.5$ 。

1.1.2 云模型理论

云模型是一种能够实现定性概念与定量数据相互转换的有效工具,基本原理:设定量论域 $U=\{x\}$ 为一个数值集合, C 为 U 上的定性概念;若定量值 x 是 C 的一次随机实现,且随机数 x 的分布具有稳定倾向,则 x 对于 C 的隶属度 $\mu(x) \in [0,1]$ 。每个 x 称为一个云滴,所有云滴在论域 U 中的分布构成隶属云。

云模型通过 3 个数字特征(期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e)表征事物的不确定性。 E_x 表示定性概念在论域中的中心值, E_n 表示定性概念的模糊程度, H_e 表示 E_n 的不确定性,反映了云滴的离散程度。云模型通过云发生器实现,正向云发生器是从定性转换为定量的过程,基于数字特征值随机生成云滴,从而在定性信息中获取定量数值的分布规律。云滴生成步骤如下:①生成以 E_n 为期望、 H_e^2 为方差的正态随机数 $E_{n,i}$;②生成以 E_x 为期望、 $E_{n,i}^2$ 为方差的正态随机数 x_i ;③根据式(7)计算隶属度 $\mu(x_i)$,可得到一个云滴 $(x_i, \mu(x_i))$;④重复上述步骤,即可生成 N 个云滴。

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_{n,i}^2}\right]$$

(7)

在溃坝生命损失风险评价中,下游淹没区的风险等级是一个定性概念,且评价过程受多种不确定因素影响。因此,本文采用云模型将评价中的模糊性和随机性转化为隶属度这一量化指标,并将下游淹没区划分为多个单元,通过分析下游淹没区所有单元,揭示溃坝生命损失风险的时空分布规律。

1.1.3 单元风险评价

根据式(8)计算下游淹没区单元的隶属度矩阵,结合组合权重,得到单元的风险评价结果,根据隶属度最大原则,即可得到单元的风险评价等级(式(9))。

$$U = W\mu = (w_1, w_2, \dots, w_j) \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1l} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{j1} & \cdots & \mu_{jl} \end{bmatrix}$$

(8)

$$L = \operatorname{argmax}\{U_1, U_2, \dots, U_l\}$$

(9)

式中: U 为单元风险评价结果; W 为指标权重; μ 为单元隶属度矩阵, μ_{jl} 为指标 X_j 对评价等级 l 的隶属度; U_l 为单元对评价等级 l 的综合隶属度; L 为单元风险评价等级。

1.2 生命损失估算

参考周克发等^[6,20]的研究,对生命损失估算公式进行修改,将权重系数改为洪水演进过程中不同时刻的组合赋权系数:

$$L_{OL} = P_{AR} f \alpha \beta$$

(10)

其中

$$\alpha = w_j \varepsilon$$

式中: L_{OL} 为生命损失人数; P_{AR} 为风险人口数; f 为风险人口死亡率,取值参考文献[6]; α 为灾害严重性程度系数; β 为修正系数, $\beta=1.4$; ε 为影响因素对风险人口死亡率的影响程度,取值参考文献[6]。

1.3 洪水演进原理

HEC-RAS(hydrologic engineering center-river analysis system)是由美国陆军工程兵团水文工程中心研发的专业水力模拟软件,具有较高计算精度和良好的 GIS 兼容性,目前广泛应用于水利工程设计、溃坝风险评估、洪泛区淹没分析等领域。HEC-RAS 的二维水动力学模型基于简化的 Navier-Stokes 方程^[21],能够有效模拟复杂地形条件下的洪水演进过程。

2 溃坝生命损失风险评价指标体系

2.1 生命损失评价指标及等级划分

溃坝生命损失的形成受到多种非线性相关因素的共同影响,现有研究通常将这些影响因素分为直接与间接两类^[6,20]。基于生命损失形成机理及现有评价模型的参数体系,选取 8 个影响因素作为溃坝生命损失评价指标,包括 4 个直接因素(风险人口数、警报时间、洪水严重性、理解程度)、4 个间接因素(风险人口组成、洪水到达时间、距坝距离和下游坡降)。

参考相关研究^[22-23],本文将评价指标划分为 5 个等级(表 2):轻微(Ⅰ级)、一般(Ⅱ级)、中等(Ⅲ级)、严重(Ⅳ级)及极其严重(Ⅴ级)。具体划分方法:定量指标如风险人口数、洪水严重性等,结合实际工程数据及相关研究确定分级阈值;定性指标如理解程度、风险人口组成等,根据分级描述进行 0~100 赋值,再按区间划分等级。

表 2 溃坝生命损失评价指标等级划分

Table 2 Grading of assessment indicators for dam breach life loss

等级	风险人口数/ (人/10 ⁴ km ²)	警报时间/h	洪水严重性/ (m ² /s)	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离/km	下游坡降/(°)
Ⅰ	0~<0.5	1.0~3.0	0~<0.5	0~<25(极明确)	80~100	0~<25(上午)	50~100	0~<5
Ⅱ	0.5~<1.0	0.75~<1.00	0.5~<4.6	25~<45(明确)	60~<80	25~<45(正午)	20~<50	5~<10
Ⅲ	1.0~<1.5	0.50~<0.75	4.6~<12	45~<65(一般)	40~<60	45~<65(下午)	10~<20	10~<15
Ⅳ	1.5~<2.0	0.25~<0.50	12~<15	65~<85(模糊)	20~<40	65~<85(夜晚)	5~<10	15~<30
Ⅴ	2.0~6.0	0~<0.25	15~45	85~100(极模糊)	0~<20	85~100(凌晨)	0~<5	30~90

2.2 评价指标云模型

确定评价指标及其分级标准后,可将各指标的等级集视为多个闭区间,从而求解其云模型的数字特征值。为提高评价方法的区分精度,设定 E_n 和 H_e 为线性相关(式(11))。随后,利用正向云发生器生成各评价指标的云模型,如图 1 所示。

$$\begin{cases} E_x = (S_{\max} + S_{\min})/2 \\ E_n = (S_{\max} - S_{\min})/3 \\ H_e = \delta E_n \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为某等级标准区间的上限值和下限值; δ 取 0.1^[24]。

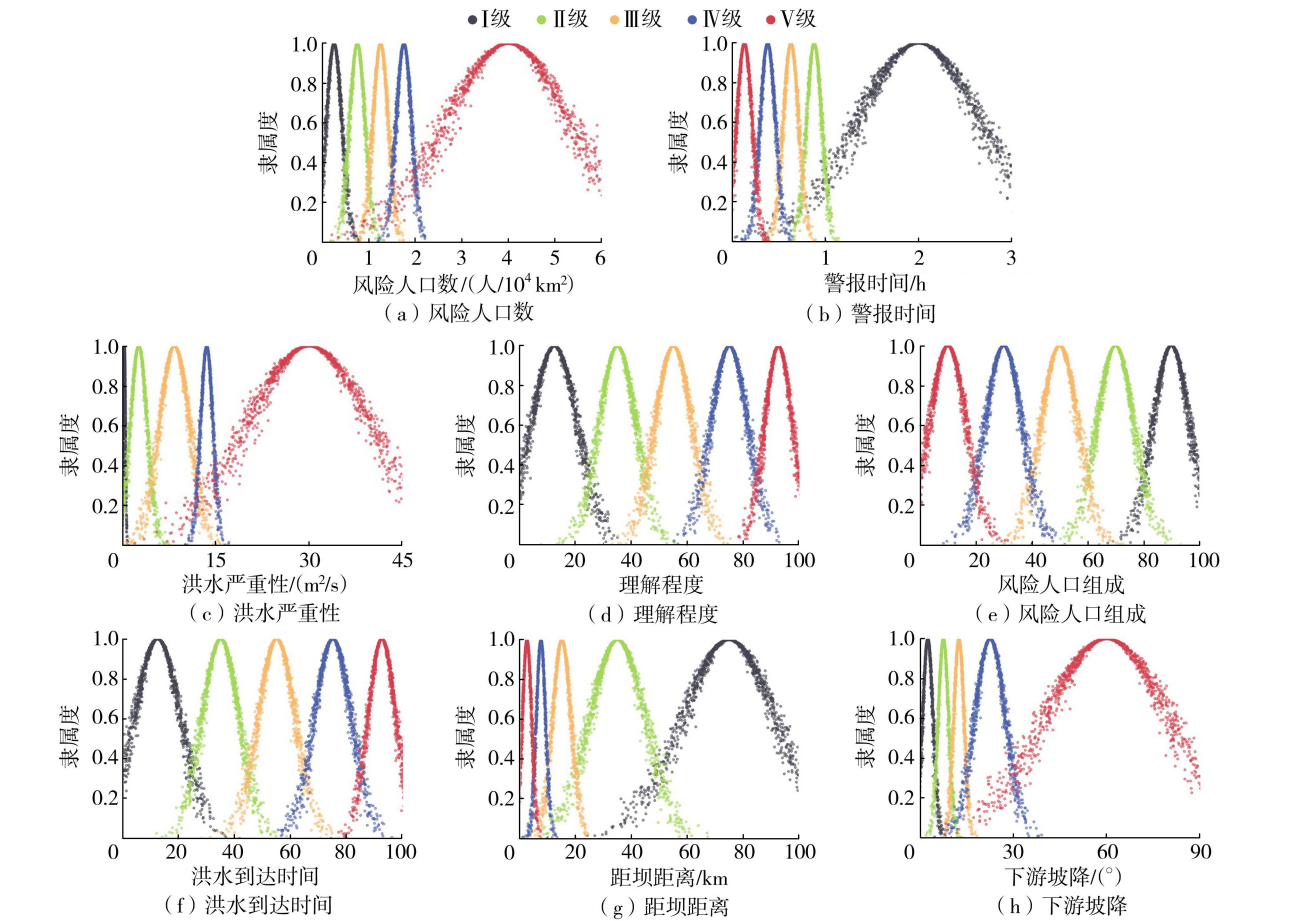


图 1 各评价指标的云模型

Fig. 1 Cloud models of each assessment indicator

3 实例验证

3.1 工程概况

YS 水库为小(1)型水库,位于贵州省六盘水市钟山区,坝址以上集雨面积为 17.03 km²。水库枢纽由大坝、溢洪道、放水涵洞等组成。大坝为黏土斜墙坝,坝顶高程为 1 827.7 m,最大坝高 22.7 m,坝顶长度 228.5 m,坝顶宽 6.0 m。水库总库容 633 万 m³,设计洪水位($P=2\%$) 1 526.63 m,校核洪水位($P=0.1\%$) 1 827 m,正常蓄水位 1 826 m。

3.2 溃坝洪水演进模型构建

利用 HEC-RAS 软件构建 YS 水库溃坝洪水演进模型。图 2 为 YS 水库数字高程数据(DEM,1:2 000),图 3 为研究区 GlobeLand30 土地利用类型,依照曼宁系数表对地表糙率赋值,其中水体糙率取 0.035,林地糙率取 0.2,草地糙率取 0.035,耕地取糙率 0.04,人造地表糙率取 0.03。水库初始条件取校核洪水位为起溃水位,坝址以下采用干燥初始条件。上游边界条件取水库校核洪水标准下的入库洪水过程线,下游边界条件设为自由出流边界,模拟泄水建筑物泄洪能力不足和校核洪水位最不利条件下导致水库漫顶溃坝的情形。计算得到溃坝洪水严重性和洪水到达时间如图 4、图 5 所示。

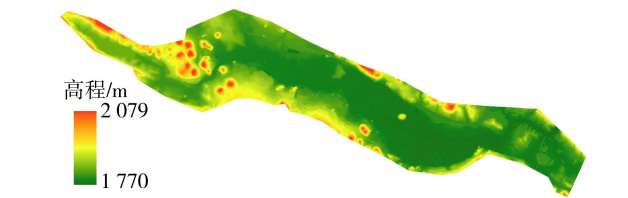


图 2 YS 水库 DEM 建模范围

Fig. 2 DEM modeling scope of YS reservoir

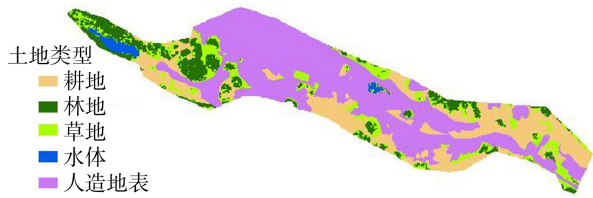


图 3 YS 水库土地利用类型

Fig. 3 Land use types of YS reservoir

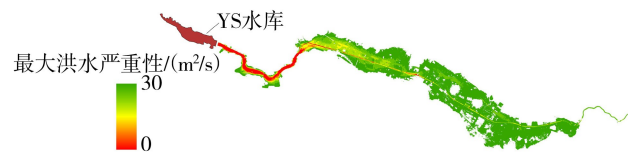


图 4 溃坝最大洪水严重性

Fig. 4 Maximum flood severity of dam breach



图 5 溃坝洪水到达时间

Fig. 5 Arrival time of dam breach flood

3.3 风险评价

3.3.1 单元信息

基于洪水演进结果确定研究范围,并建立空间地理信息单元,单元尺寸为 10 m×10 m。各单元的 8 个评价指标数据的赋值如下:单元风险人口数基于 2020 年第七次人口普查数据,行政区划统计到第 4 级(乡镇级),在计算人口密度的基础上,结合研究区居民的分布情况,为每个单元赋值,研究区单元人口分布如图 6 所示。单元警报时间为洪水到达时间与警报通知时间的差值,警报通知时间取 10 min^[25]。单元的洪水严重性和洪水到达时间由洪水演进模型得出。单元理解程度以六盘水市钟山区人口受教育程度比例为依据,随机抽样赋值,钟山区人口大学:高中:初中:小学:文盲的比例为 0.173:0.141:0.287:0.252:0.147。单元人口组成以六盘水市钟山区青年人口比例(65.45%)为期望,按正态分布原则生成随机数。单元距坝距离为各单元中心到大坝坝轴线的距离,单元下游坡降由 DEM 数字高程数据通过空间分析提取。

3.3.2 权重计算

G1 法计算主观权重,邀请专家对评价指标进行序关系排序和重要程度赋值,相邻指标重要程度及指标主观权重见表 3。同时,结合洪水演进的动态过程,利用熵权法计算得到各洪水历时评价指标的客观权重(表 4)。主观权重是基于专家经验赋予不同指标相对稳定的优先级,其权重分布较为均衡;而客观权重则依



图 6 研究区人口分布

Fig. 6 Population distribution in study area

据洪水演进中指标的实时波动性进行动态调整,其中风险人口数和洪水严重性的权重随洪水历时变化明显。因此,有必要结合主客观权重之间的差异,以实现专家经验与工程数据之间的平衡。

表 3 G1 法重要程度赋值及主观权重

Table 3 Importance degree assignment and subjective weights of G1 method

指标	r_j	主观权重	指标	r_j	主观权重
风险人口数		0.154	风险人口组成	1.40	0.105
警报时间	1.00	0.154	洪水到达时间	1.00	0.105
洪水严重性	1.05	0.145	距坝距离	1.00	0.105
理解程度	1.00	0.145	下游坡降	1.20	0.087

表 4 熵权法得到的各洪水历时评价指标的客观权重

Table 4 Objective weights of assessment indicators under different flood durations obtained by entropy weight method

洪水历时/h	风险人口数	警报时间	洪水严重性	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离	下游坡降
0.75	0.674	0.013	0.145	0.039	0.010	0.014	0.038	0.067
1.00	0.621	0.026	0.165	0.041	0.013	0.026	0.048	0.060
1.50	0.383	0.063	0.232	0.062	0.019	0.064	0.084	0.093
2.00	0.323	0.041	0.268	0.082	0.020	0.041	0.115	0.110
4.00	0.275	0.134	0.292	0.082	0.017	0.000	0.089	0.111
6.00	0.264	0.121	0.337	0.073	0.017	0.002	0.081	0.105
12.00	0.249	0.114	0.374	0.069	0.016	0.002	0.076	0.100
24.00	0.245	0.100	0.429	0.060	0.013	0.019	0.048	0.086

由式(6)得到各洪水历时下评价指标的组合权重(表 5)。结果显示,洪水历时为 0~2 h,风险人口数的组合权重占主导地位,该时间段以人口暴露风险为核心;洪水历时为 2~24 h,洪水严重性的组合权重逐渐增大,其他指标组合权重趋于平稳。整个过程中,风险人口数和洪水严重性是影响生命损失的两个主导因素。其中,风险人口数组合权重在溃坝初期达到最大值 0.414,随后逐渐下降,至 24 h 时降至 0.199,表明溃坝初期,人口的空间分布对生命损失具有决定性作用,而随着时间推移,其影响逐渐减弱。洪水严重性的组合权重则呈现相反趋势,从 0.75 h 的 0.145 持续上升至 24 h 的 0.288,表明随着洪水的传播,水力参数如水深、流速的威胁性增强。警报时间和理解程度的组合权重波动较小,均呈现先增加后减弱的趋势,其余指标的组合权重普遍较低。

表 5 各洪水历时下评价指标的组合权重

Table 5 Combined weights of assessment indicators under different flood durations

洪水历时/h	风险人口数	警报时间	洪水严重性	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离	下游坡降
0.75	0.414	0.083	0.145	0.092	0.057	0.059	0.071	0.079
1.00	0.387	0.090	0.156	0.094	0.059	0.065	0.076	0.073
1.50	0.268	0.108	0.189	0.104	0.062	0.084	0.094	0.091
2.00	0.238	0.097	0.207	0.114	0.062	0.073	0.110	0.099
4.00	0.214	0.144	0.219	0.114	0.061	0.052	0.097	0.099
6.00	0.209	0.137	0.242	0.109	0.061	0.053	0.093	0.096
12.00	0.201	0.134	0.260	0.107	0.060	0.053	0.090	0.095
24.00	0.199	0.127	0.288	0.103	0.059	0.062	0.076	0.086

3.3.3 综合评价结果

通过计算各单元各评价指标的隶属度矩阵,并与对应洪水历时的指标组合权重相乘,得到各单元的综合隶属度,取最大隶属度为单元的风险等级。为方便理解,以洪水历时 1.50 h 的某单元数据为例,来说明单元风险等级的计算过程。该单元的评价指标数据及其对应的等级隶属度见表 6,结合该洪水历时的指标权重,计算得到 $U_I = 0.079$ 、 $U_{II} = 0.111$ 、 $U_{III} = 0.118$ 、 $U_{IV} = 0.152$ 、 $U_V = 0.312$,得出 $U_V > U_{IV} > U_{III} > U_{II} > U_I$,故该单元的风险等级为 V 级。同理对各洪水历时各单元的指标数据进行计算,可得到各洪水历时溃坝下游整体单元的评价结果。考虑到篇幅问题以及洪水历时 6 h 后风险分布变化不大,选取 4 个典型洪水历时的风险等级云图进行展示,如图 7 所示。不同洪水历时下风险等级的频数变化如图 8 所示。

表 6 洪水历时 1.50 h 某单元评价指标隶属度结果

Table 6 Membership degree results of assessment indicators for a certain unit at flood duration of 1.50 h

评价指标	单位	数值	隶属度				
			μ_I	μ_{II}	μ_{III}	μ_{IV}	μ_V
风险人口数	人/10 ⁴ km ²	2.00	0.000	0.000	0.000	0.325	0.325
警报时间	h	0.83	0.216	0.882	0.044	0.000	0.000
洪水严重性	m ² /s	12.01	0.000	0.000	0.322	0.332	0.198
理解程度		99.00	0.000	0.000	0.000	0.002	0.430
风险人口组成		53.92	0.000	0.054	0.841	0.002	0.000
洪水到达时间		97.86	0.000	0.000	0.000	0.003	0.563
距坝距离	km	2.64	0.000	0.005	0.001	0.014	0.996
下游坡降	(°)	4.15	0.614	0.132	0.000	0.001	0.020

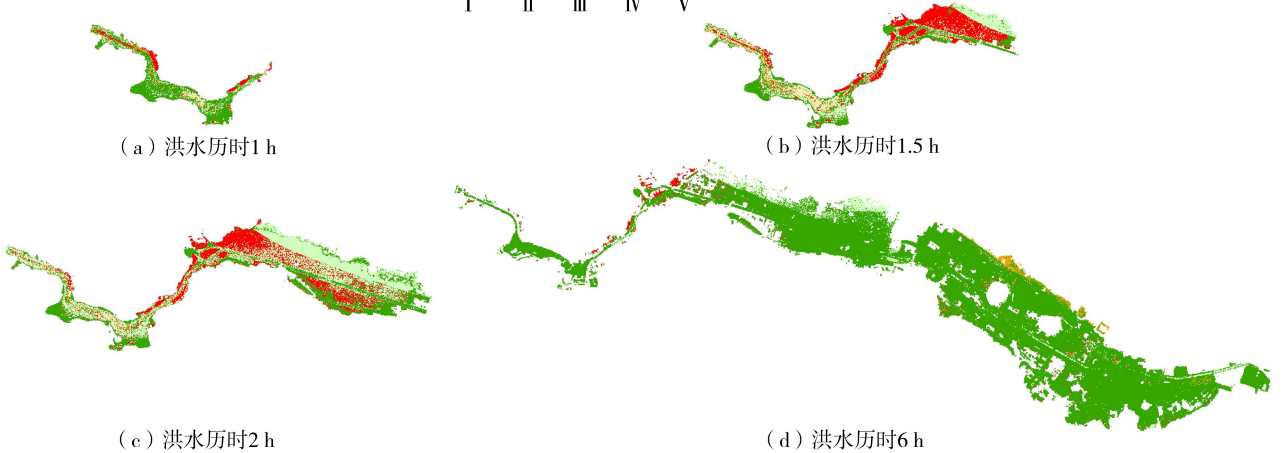
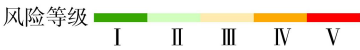


图 7 各典型洪水历时溃坝下游的风险等级云图

Fig. 7 Risk level cloud maps for downstream area of dam breach under typical flood durations

洪水历时为 0~6h,受灾单元总数呈现快速增长趋势,在 6h 和 12h 达到峰值,随后在 24h 略有下降。下游风险的时空演变规律主要为:①洪水历时为 0~2h,高风险区域不断扩大,且随着时间推移,高风险区逐渐向下游居民聚集区扩散;V 级高风险单元数量急速增加,在 2 h 时达到峰值,占比达 24.47%;②洪水历时为 2~4 h,高风险区域的范围开始缩小,V 级高风险单元减少,而 I 级低风险单元大幅增加;③洪水历时为 4~24 h,风险格局逐渐趋于稳定,大部分区域为低风险区,只有少部分人口密集区域仍然为高风险区;尽管 I 级低风险单元在 24 h 时有所减少,但其占比达到了峰值 90.93%。

根据式(10)计算各时刻各单元的生命损失,并与周克发等^[6,20]的估算模型进行对比,最终得到的溃坝生命损失结果(表 7)。本文方法与其他两种方法的计算结果整体趋势一致,各洪水历时的生命损失估算值差异较小,表明本文方法是可靠的。此外,本文方法考虑了不同洪水历时下各评价指标数据的动态变化,更符合洪水演进的实际过程,从而能更准确反映溃坝初期洪水对受灾群体风险的影响。

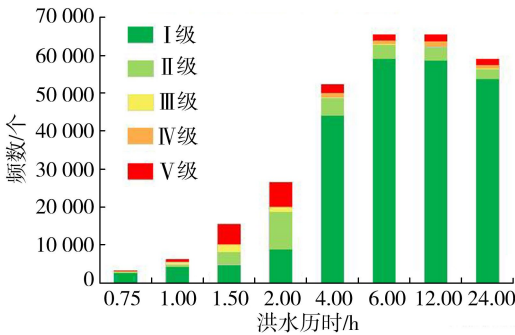


图 8 不同洪水历时下风险等级的频数变化

Fig. 8 Frequency variation of risk levels under different flood durations

表 7 溃坝生命损失估算结果对比

Table 7 Comparison of estimation results for dam breach life loss

洪水历时/h	生命损失/人		
	本文方法	周克发等 ^[6]	吴欢强等 ^[20]
0.75	3	3	2
1.00	10	9	8
1.50	62	59	54
2.00	78	75	68
4.00	92	91	84
6.00	101	103	94
12.00	103	106	97
24.00	107	112	103

根据 SL/T 829—2024《水库大坝风险等级划分与评估导则》^[26],水库大坝生命损失风险从高到低分为极高风险、高风险、中风险、低风险共 4 级。本文采用风险矩阵法评估大坝运行期内的风险,该方法综合考虑溃坝可能性和溃坝后果严重性。在溃坝可能性方面,YS 水库工程整体结构安全,水库抗洪能力满足要求,工程渗流现状整体安全,水库运行管理良好,因此溃坝可能性评定为“基本满足安全要求”,等级为 2 级^[26]。在溃坝后果严重性方面,YS 水库可能导致的生命损失超过 100 人,生命损失严重性评定为“灾难性”,等级为 S5^[26]。根据风险矩阵,判定 YS 水库生命风险为高风险。结合 YS 水库所处城市的地理位置,该风险评估结果符合客观实际。

4 结 语

G1 法-熵权法组合赋权法融合了洪水演进过程中的数据变化,能有效平衡溃坝生命损失风险评价中相关指标的主客观权重。权重结果表明,在溃坝洪水演进过程中,风险人口数和洪水严重性指标的权重贡献最为显著;风险人口数指标的权重在溃坝初期达到峰值 0.414 后呈单调递减趋势,而洪水严重性指标的权重则随时间推移从 0.145 逐渐增加至 0.288,其余指标的权重波动较小。组合赋权-云模型方法能有效处理风险评估过程中的随机性和模糊性问题,实现了溃坝过程的动态风险评估,揭示了 YS 水库溃坝下游风险的时空分布规律:洪水历时 0~2 h,高风险区域不断扩大,主要分布于人口密集地区;洪水历时 2~4 h,高风险区域范围缩小;洪水历时 4~24 h,风险格局逐渐趋于稳定,大部分地区处于低风险区。YS 水库溃坝生命损失约为 107 人,与传统计算方法相比,本文方法融入客观数据来评估指标权重,突出了洪水演进对生命损失的动态影响。风险矩阵法评估表明:YS 水库溃坝可能性等级为 2 级,溃坝后果严重性等级为 S5,综合评估生命风险等级为高风险,需优先采取风险防控措施。

参考文献:

[1] 陈云,王义俊,郑霞忠,等. 融合案例挖掘与贝叶斯网络的溃坝事故致因风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024,52(4):13-21. (Chen Yun, Wang Yijun, Zheng Xiazhong, et al. Risk analysis of dam break accident combining case mining and Bayesian network[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024,52(4):13-21. (in Chinese))

[2] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3):84-93. (in Chinese))

[3] Brown C A, Graham W J. Assessing the threat to life from dam failure[J]. 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] Graham W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[J]. Sedimentation & River Hydraulics,1999,6(5):21-43.

[6] 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(3):145-149. (Zhou Kefa, Li Lei, Sheng Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment,2007(3):145-149. (in Chinese))

[7] Li Zongkun, Li Wei, Ge Wei. Weight analysis of influencing factors of dam break risk consequences[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2018,18(12):3355-3362.

[8] 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 Wei, Jiao Yutie, Hong Xinqian, 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. (in Chinese))

[9] Zhu Yantao, Niu Xinqiang, Gu Chongshi, et al. A fuzzy clustering logic life loss risk evaluation model for dam-break floods[J]. Complexity,2021,2021:7093256.

[10] Ge Wei, Wang Xiuwei, Li Zongkun, et al. Interval analysis of the loss of life caused by dam failure[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2021,147(1):04020098.

[11] Yin Qiaogang, Li Yanlong, Zhang Ye, et al. Assessment of loss of life caused by dam failure based on fuzzy theory and hybrid

random forest model[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2024,38(9):3619-3637.

[12] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20. (Li Deyi,Meng Haijun,Shi Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development,1995,32(6):15-20. (in Chinese))

[13] 康玲,廖武丰,周丽伟,等. 耦合高斯-极值分布与云模型的防洪调度预案风险分析方法[J]. 水利学报,2025,56(3):309-316. (Kang Ling,Liao Wufeng,Zhou Liwei,et al. A method coupled Gaussian-Extreme distribution with Cloud models for risk analysis of flood control operational scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(3):309-316. (in Chinese))

[14] 王媛,张志慧,任杰,等. 基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):56-63. (Wang Yuan,Zhang Zhihui,Ren Jie,et al. Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):56-63. (in Chinese))

[15] 周兰庭,郭枫,王浩. 土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):86-92. (Zhou Lanting,Guo Feng,Wang Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):86-92. (in Chinese))

[16] 左锋琴,张达敏,邓佳欣,等. 全局搜索和云模型动态扰动的鱼鹰优化算法[J]. 计算机工程与设计,2025,46(4):966-973. (Zuo Fengqin,Zhang Damin,Deng Jiaxin,et al. Osprey optimization algorithm based on global search and dynamic disturbance of cloud model[J]. Computer Engineering and Design,2025,46(4):966-973. (in Chinese))

[17] 孙斌,李浩,毛占利,等. 基于序关系分析法的大型综合体火灾风险评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(2):81-88. (Sun Bin,Li Hao,Mao Zhanli,et al. Fire risk assessment of large complex based on order relation analysis method[J]. China Safety Science Journal,2025,35(2):81-88. (in Chinese))

[18] 黄莉,张祎喆,万旭哲,等. 多元型复合灾害系统适应性评估:以粤港澳大湾区为例[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版). 2025-02-05. (Huang Li,Zhang Yizhe,Wan Xuzhe,et al. Adaptive evaluation of multivariate compound disaster systems;a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences). 2025-02-05. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250205.1544.032>. (in Chinese))

[19] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng,Shi Yongjie,Liu Jun,et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[20] 吴欢强,傅琼华,董建良. 我国溃坝生命损失估算方法探讨[J]. 中国水利,2010(8):24-26. (Wu Huanqiang,Fu Qionghua,Dong Jianliang. Discussion on the methods of estimating loss of life in dam failure in China[J]. China Water Resources,2010(8):24-26. (in Chinese))

[21] 张玉涛,白静,陈振宇,等. HEC-RAS 模型原理及应用研究进展[J]. 环境工程,2023,41(增刊 2):233-237. (Zhang Yutao,Bai Jing,Chen Zhenyu,et al. A review of the principle and application of HEC-RAS model[J]. Environmental Engineering,2023,41(S2):233-237. (in Chinese))

[22] 姬艳婷. 基于云物元法的溃坝后果综合评价[D]. 郑州:郑州大学,2020.

[23] 殷乔刚. 基于机器学习与灰色-可变模糊耦合方法的溃坝后果评价研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.

[24] 魏博文,黄海鹏,徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊 1):3092-3099. (Wei Bowen,Huang Haipeng,Xu Zhenkai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(S1):3092-3099. (in Chinese))

[25] 焦余铁. 基于洪水演进和风险人口避难模拟的溃坝生命损失评估[D]. 郑州:郑州大学,2021.

[26] SL/T 829—2024 水库大坝风险等级划分与评估导则[S].

(收稿日期:2025 - 05 - 14 编辑:刘晓艳)