

基于云模型的山区桥梁水毁风险评估

余昊正¹, 汪斌¹, 李秀华^{2,3}, 马雅林³, 黄晓刚⁴

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆市 400044; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 4. 四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对山区桥梁水毁风险因素耦合复杂、现有评估方法针对性不足等问题, 提出了一种基于云模型与层次分析法相结合的山区桥梁水毁风险综合评估框架。在识别山区桥梁水毁特有的风险因素的基础上, 构建三级指标结构, 利用云模型的数字特征(期望、熵、超熵)处理评估过程中的随机性与模糊性, 实现了从定性评价到定量风险等级的映射。以某山区桥梁为例进行分析, 评估结果显示其综合水毁风险等级为中等, 其中水深/墩宽比与冲刷深度是关键风险因子。该方法可精准定位风险关键点, 为山区桥梁的防洪设计、安全管养提供科学依据, 并为类似复杂环境下的基础设施风险评估提供参考。

关键词: 桥梁水毁; 山区桥梁; 风险评估; 云模型

中图分类号: U447; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0070-06

Risk Assessment of Water Damage to Mountain Bridges Based on Cloud Model

YU Haozheng¹, WANG Bin¹, LI Xiuhua^{2,3}, MA Yalin³, Huang Xiaogang⁴

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 4. Sichuan Road and Bridge Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: In view of the problems such as the complex coupling of risk factors for water damage to bridges in mountainous areas and the insufficient pertinence of existing assessment methods, a comprehensive assessment framework for water damage risk of mountain bridges based on the combination of cloud model and analytic hierarchy process is proposed. Based on the identification of the unique risk factors of water damage to bridges in mountainous areas, a three-level indicator structure is constructed. The digital characteristics (expectation, entropy, and hyper-entropy) of the cloud model are utilized to handle the randomness and fuzziness in the assessment process, achieving the mapping from qualitative evaluation to quantitative risk levels. Taking a mountain bridge as an example, the analysis is conducted. The assessment results show that its comprehensive water damage risk level is medium, in which the water depth/pier width ratio and the scouring depth are the key risk factors. This method can accurately locate the key points of risks, providing a scientific basis for flood control design, safety management and maintenance of mountain bridges, and offering a reference for risk assessment of infrastructures in similar complex environments.

Keywords: water damage to bridge; mountain bridge; risk assessment; cloud model

0 引言

山区地形地貌复杂、地质条件多变,加之极端降雨事件频发,桥梁在运营过程中面临较为严重的水毁风险。王飞等^[1]系统归纳了桥墩局部冲刷的影响

参数,通过模糊数学方法建立因子与冲刷概率的隶属关系,形成了桥墩局部冲刷风险预测模型。然而,关于系统化的桥梁水毁风险研究较少。国内水毁风险研究更多集中在线路水毁方面。白子培等^[2]从地理学视角分析了四川省公路水毁的环境特征,将其界定为一个由公路、地质、地貌、气候、植被及人类活动等多因子构成的复杂灰色系统。李家春等^[3]则从致灾因子、承灾体、灾情及防灾减灾4个维度,构建了山区公路水灾评价指标体系。在评价方法方面,曾蓉等^[4]运用模糊数学理论,结合熵权法确定因子权重,构建了基于熵权融合的公路水毁评价模型。

收稿日期: 2025-12-26

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题(2025-重点-19);西藏自治区科技项目(XZ202402ZD0003)

作者简介: 余昊正(2000—),男,硕士,学生,从事桥涵水文研究工作。

通信作者: 黄晓刚(1984—),男,学士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。电子信箱: 35433154@qq.com

武永峰等^[5]综合地理信息系统与灰色综合评价法,建立了公路交通暴雨风险评估模型。林孝松等^[6]围绕某国道线,从孕灾环境、致灾因子、承灾体及灾情4个方面构建了公路洪灾风险评估体系。针对山区沿河路段,齐洪亮等^[7]基于信息熵模型,提出了路基灾害危险性定量评价方法及分级体系。杨栓成等^[8]采用层次分析法和确定性系数法,对中巴公路奥一布段的水毁危险性与易损性进行了等级划分。此外,刘卫民等^[9]以进藏公路为研究对象,识别出河水溢岸与降雨量为主要致灾因子,以总信息量作为危险性评价依据,构建了进藏通道水毁灾害危险性评估方法。

从上述已有相关研究看,当前专门针对桥梁水毁风险特别是山区桥梁水毁风险的研究较少。云模型是一种处理定性概念与定量数值之间不确定性转换的有效工具,近年来在桥梁风险评估领域展现出巨大潜力^[10-13]。本文在梳理山区桥梁致灾因素的基础上,采用层次分析法构建目标层、一级指标层和二级指标层的层次结构,并利用云模型的方法处理评估过程中的随机性与模糊性,实现了定性评价向定量风险等级的映射,最终构建了适用于复杂山区的桥梁水毁风险评估框架。

1 山区桥梁水毁关键影响因素与指标量化

与平原地区相比,山区桥梁水毁致灾环境能量高、变率大、因素复杂,其风险更高。林孝松等^[6]在公路洪灾风险评估体系研究中,明确了孕灾环境、致灾因子、承灾体及灾情4个主要因素。对于桥梁而言,孕灾环境即为环境条件,致灾因子即为水文条件,承灾体即为桥墩条件。灾情为水毁后经济损失,本文暂未纳入。

在水文条件方面,设计防洪标准、流速、水深、漂浮物和含沙量等影响较大,视为关键水文因素。山区短时强降雨可形成暴涨型洪水,设计防洪标准表征山区洪水事件的发生概率与强度。山区河床坡降较大,导致水流势能变化较大,从而增大流速。河谷束窄,水深易急剧增加。山区河流流速和水深决定着桥墩的动水压力和冲刷能力。与平原河流漂浮物特征不同,山区洪水常裹挟粗大树木。它们直接撞击桥墩,或在桥前壅塞急剧抬高水位并产生巨大的静水推力。山区高含沙含石水流具有较强的桥梁冲刷能力。

在桥墩条件方面,墩身结构状况、墩型、既有冲

刷程度、水流交角等因素影响较大,可视为关键结构因素。墩身混凝土强度和质量决定了耐磨蚀性能。墩型决定了绕流涡流的形态与强弱,影响着局部冲刷。尖头墩或圆头墩等流线型设计能有效引导水流和漂浮物,减小冲击力和壅水。既有冲刷程度是桥梁水毁的首要原因。山区河道蜿蜒曲折,较大的水流交角会显著增大局部冲刷深度和漂浮物冲击拥堵风险。

在环境条件方面,河床土质构成、植被覆盖、河道几何形态、河床坡度以及人为影响等被视为关键环境因素。山区河床表面多为大块卵石、砾石或基岩,非均质程度极高。良好的植被覆盖可以稳固岸坡、减缓径流、降低水土流失,是减小水毁风险的重要自然屏障。山区河道常蜿蜒曲折,河道形态决定了流态。河床坡度较大是山区河流区别于平原河流的根本特征,是高流速、强冲刷能力的势能来源。此外,上游不合理的采砂、沿河工程建设等人为活动,会明显改变山区河流的水沙平衡,导致桥位冲淤特性的变化。

上述水文、结构与环境因素以定性认识为主,难以有效区分各因素对山区桥梁水毁风险的影响,也无法实现不同桥位、不同洪水情境下的水毁风险比较。需要将定性认识转化为可量化的评价指标。本节参照增加参考文献规范,并结合王飞等^[1]、李家春等^[3]及林孝松等^[6]的相关研究成果,将山区桥梁水毁风险指标划分为3个一级因素以及14个二级因素,并一一进行量化。拟定相关评价指标量化如表1所示。

2 云模型桥梁水毁风险评估方法

山区桥梁水毁风险受诸多因素影响,具有随机性和模糊性,传统风险评估方法较难同时反映这些特征。云模型是一种基于概率与模糊数学的不确定性认知工具,通过数学化的方式描述定性概念的模糊性与随机性。本节利用云模型方法对桥梁水毁风险评估中的不确定性和模糊性进行建模,较为准确地表达不同风险等级之间的过渡特征。在此基础上,下一节将通过层次分析法合理确定各风险因素的权重。

2.1 云模型概念

云模型是李德毅院士^[14]提出的一种基于概率与模糊数学的不确定性认知工具。使用云滴群的分布特征,揭示模糊性与随机性。设定一个数值范围U,

表 1 桥梁水毁风险指标量化

一级因素	二级因素	风险评价指标量化
水文条件 A1	设计防洪标准 B1	洪水重现期 (<5 年、5~20 年、20~50 年、≥50 年)
	水流流速 B2/ (m·s ⁻¹)	<3、3~5、5~8、≥8
	水深 B3	水深/墩宽比 (<0.8、0.8~1.43、1.43~2.06、≥2.06)
	水流漂浮物 B4	漂浮物量(无、少量、较多、大量)
	水流含沙量 B5/(kg·m ⁻³)	含沙量(<0.1、0.1~1、1~10、≥10)
桥墩条件 A2	桥墩结构状况 B6	混凝土表面状态(完好、蜂窝麻面≤20% 或剥落≤3%、蜂窝麻面>20%或剥落 3%~10%、剥落>10%)
	墩型 B7	墩型系数(圆柱群桩、圆头墩、尖头墩、 方形墩)
	冲刷程度 B8	冲刷深度(无冲刷、局部冲刷、浅基冲 空、地基失效)
	水流交角 B9	水流与桥墩轴线夹角(0°~10°、10°~20°、 20°~40°、≥40°)
环境条件 A3	河床土体构成 B10	土体中值粒径/mm(岩石 D ₅₀ ≥250、砾石或 卵石 16~250、黏性土 2~16、砂 D ₅₀ <2)
	河床植被覆盖 B11	植被覆盖程度(多处覆盖、部分覆盖、少 量覆盖、无覆盖)
	河道几何形态 B12	河道形态(顺直型、顺直微弯型、曲折 型、蜿蜒曲折型)
	河床坡度 B13	河床比降(0~0.1%、0.1%~1%、1%~2%、 >2%)
	人为影响 B14	人类活动干扰程度(可忽略、局部失衡、 周期性威胁、动力崩溃)

它代表了一个特定的定量论域。设定定性概念 C，它描述了 U 内元素的一种抽象属性或类别。若定量值 $x \in U$ 为定性概念 C 在 U 中的一次随机实现， x 对 U 的隶属度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是一个具有稳定倾向的随机数，反映了 x 符合概念 C 描述的程度。 x 在论域 U 上的分布称为云，每一个 x 称为云滴。

云模型具有 3 个数值特征：期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e ，用来刻画不确定性量的统计规律。对于区间 $[R_{\min}, R_{\max}]$ ，可以采用以下公式数值特征^[15]：

$$E_x = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2} \tag{1}$$

$$E_n = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} \tag{2}$$

$$H_e = k \tag{3}$$

式中： $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$ 为区间上下限； k 为指定常数，一般取 0.5。期望 E_x 反映云滴数据分布的中心值；熵 E_n 反映不确定性量的模糊性和随机性程度，用于描述云滴的离散度；超熵 H_e 描述熵的不确定性，反映云的厚度和边界模糊度。

2.2 云发生器

云模型包含正向云发生器和逆向云发生器两大算法。正向云发生器根据已知的期望值、熵和超熵生成云滴，实现定性到定量的转换。正向云发生器对每个云滴生成一个以 E_n 为期望、 H_e 为标准差的随机波动值 E_n' ，然后以 E_x 为期望、 E_n' 为标准差生成一个定量随机数 x 。根据 x 和 E_x 、 E_n' 的关系计算该云滴隶属度 $\mu(x)$ ：

$$\mu(x) = e^{\frac{-(x - E_x)^2}{2E_n'^2}} \tag{4}$$

正向云发生器能够生成一系列云滴，这些云滴在定量论域上的分布及其隶属度共同构成了对定性概念的完整描述。

而逆向云发生器则通过分析已有的云滴，反推这 3 个特征数字，完成从定量样本到定性概念的转换。

2.3 基于云模型的风险等级

在桥梁水毁风险评估中，将综合风险^[16]分为“轻微风险”、“中等风险”、“较高风险”、“重度风险”4 个等级。根据经验和实际需求将水毁各级风险区间划分为 $[0, 25)$ 、 $[25, 50)$ 、 $[50, 75)$ 、 $[75, 100]$ 4 个区间，依次对应上述 4 个风险等级，并根据式(1)~(3)计算云模型特征值，如表 2 所示。将这些特征输入正向云发生器，即可得到不同风险等级的云图，以表达各风险等级的分布范围和隶属度。

表 2 桥梁水毁风险评语集数字特征

风险评价等级	E_x	E_n	H_e	区间
轻微风险	12.5	4.166 7	0.5	$[0, 25)$
中等风险	37.5	4.166 7	0.5	$[25, 50)$
较高风险	62.5	4.166 7	0.5	$[50, 75)$
重度风险	87.5	4.166 7	0.5	$[75, 100]$

设定云滴数量为 1 000，对桥梁水毁风险等级使用正向云发生器，得到云图(见图 1)。如图所示，分布着 4 个对应各风险等级的正态云团，直观展现了桥梁水毁风险等级在论域 $U = [0, 100]$ 上的定性概念表达。云滴的离散程度由超熵控制，云层具有一定的厚度但整体聚拢，表示该评语集既包含随机变化，又具有稳定的定性倾向。

2.4 基于云模型的桥梁水毁风险评估

在桥梁水毁风险评估中，引入专家打分法，依据表 1 量化值对每个单一指标变量，采用正态分布模拟打分，并基于云模型的逆向云发生器，对每个变量的打分样本进行反算，以得到每个二级指标对应云模型的数值特征。依据该数值特征，采用正向云发

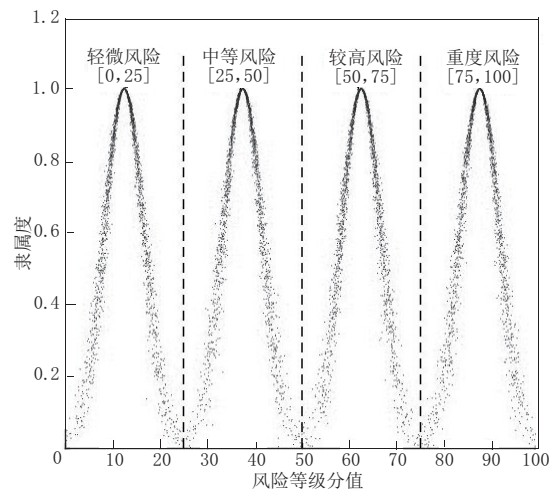


图1 桥梁水毁风险评语集分布云图

生器,建立二级指标云图。一级指标的云模型数字特征可通过对其下属二级指标云特征按照权重进行加权合成获得^[15],类似地,目标层综合云特征则由一级指标云特征加权合成而成。综合云模型的数字特征可表达为:

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} w_i \tag{6}$$

$$E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{ni}^2 w_i} \tag{7}$$

$$H_e = \sum_{i=1}^n H_{ei} w_i \tag{8}$$

式中: w 为各指标所占权重。生成综合评价云的数值特征后,用正向云发生器可以生成大量云滴样本,从而绘制综合评价云图,以直观反映综合风险的概率隶属度分布。最后根据综合评价云图计算对于桥梁水毁风险评语集的隶属度,判断该桥梁的综合风险评价等级。

3 基于层次分析法的水毁指标权重分配

3.1 桥梁水毁风险评估指标层构建

层次分析法是一种系统化、层次化的多准则决策方法,其核心思想是通过构建层次结构模型,将复杂问题分解为多层级结构,利用专家经验对同一层级内的因素进行两两比较,形成判断矩阵,进而量化各因素的相对重要性权重。参照表1内容,将桥梁水毁风险指标体系划分目标层、一级指标层和二级指标层。其中目标层为桥梁水毁风险等级。一级指标层为A级,例如水文条件因素(A1)。二级指标层为B级,例如水文条件因素设计防洪标准(B1)。

3.2 桥梁水毁因素判断矩阵

将桥梁水毁风险各二级指标一一进行比较,设

准则层包含 n 个因素 $C_1, C_2, \dots, C_n$, 对比矩阵 A 为 $n \times n$ 方阵,元素 a_{ij} 表示因素 C_i 相对于 C_j 的重要性程度。依据表3中1~9标度体系,对因素间的相对重要性进行量化赋值。

表3 云模型相对重要性量表^[17]

标度	说明
1	两个元素同等重要
3	相较之下其中1个元素略微重要
5	相较之下其中1个元素显著重要
7	相较之下其中1个元素强烈重要
2, 4, 6, 8	作为上述标度的中间值
其中 $a_{ii}=1, a_{ij} \geq 0$ 定义 i 与 j 比较的判断的元素为 a_{ij} , 则有 $a_{ji}=1/a_{ij}$	

按照表中标度,根据指标体系层次模型,两两比较构造得到判断矩阵。基于现场实地调查以及桥梁水毁相关研究成果,得到判断矩阵^[18]。构造一级指标层判断矩阵 $M-A$, 如表4所示,构造二级指标层判断矩阵 $A-B$, 如表5~7所示。

表4 一级指标层判断矩阵

目标层M	A1	A2	A3
A1	1	1/3	1
A2	3	1	3
A3	1	1/3	1

表5 水文条件因素A1判断矩阵

目标层A1	B1	B2	B3	B4	B5
B1	1	1/2	3	1/2	1/2
B2	2	1	5	1	1
B3	1/3	1/5	1	1/5	1/5
B4	2	1	5	1	1
B5	2	1	5	1	1

表6 桥梁因素A2判断矩阵

目标层A2	B6	B7	B8	B9
B6	1	4	4	6
B7	1/4	1	1	2
B8	1/4	1	1	2
B9	1/6	1/2	1/2	1

表7 环境因素A3判断矩阵

目标层A3	B10	B11	B12	B13	B14
B10	1	5	3	1/2	1
B11	1/5	1	1/2	1/3	1/5
B12	1/3	2	1	1/2	1/3
B13	2	3	2	1	2
B14	1	5	3	1/2	1

在构建判断矩阵时,权重的分配基于对第1节所述山区致灾机理的深刻理解和工程实践经验。在一级指标层中,在山区恶劣的外部致灾环境下,桥梁自身的承载能力和抗灾性能是内因。根据灾害演化机理,外因通过内因起作用。在同等致灾强度下,桥梁结构的完好程度直接决定了其易损性水平。特别是

在山区,洪水频发,依靠改善水文环境难度极大,确保结构自身的抵抗能力是降低风险的关键可控因素,因此赋予桥墩条件“3”的相对重要性,根据表4中判断矩阵计算得出权重占比“60%”。水文条件和环境因素作为外因,虽然是灾害的驱动力,但其最终破坏效果取决于桥梁的抵抗能力。

在二级指标层,权重的分配同样考虑了山区风险特征。在桥梁因素中,桥墩混凝土结构的权重最高(局部权重 59.4%,全局权重 35.6%)。这是因为在山区高含沙量和漂石冲击的水流中,混凝土的抗磨损和抗冲击能力是抵抗结构持续损伤、防止钢筋锈蚀和结构失效的关键第一道防线。而在环境因素中,河床坡度的权重最高(局部权重 32.7%),这正是因为坡降是山区河流高能量的根本来源。

计算表4~7数据可计算得到桥梁水毁风险评价判断矩阵权重结果,如表8所示。

表8 判断矩阵权重					
矩阵	λ_{max}	W	CI	RI	CR
M-A	3.0	[0.2, 0.6, 0.2]	0.0	0.52	0.0
A ₁ -B	5.01	[0.14, 0.269, 0.051, 0.269, 0.269]	0.002 5	1.12	0.002 2
A ₂ -B	4.01	[0.594, 0.16, 0.16, 0.086]	0.003 3	0.89	0.003 7
A ₃ -B	5.221	[0.249, 0.064, 0.111, 0.327, 0.249]	0.055	1.12	0.049 1

一致性指标是用来判断矩阵是否满足一致性的数学指标。CR为常用的一致性指标,CI为判断矩阵的一致性指标,RI为与判断矩阵规模相同的随机一致性指标,值可以从一致性对照表中查找。根据层次分析法的一致性检验^[19],所有判断矩阵的CR<0.1,均满足一致性要求,权重分配合理。

因此,根据第1节中各二级指标所对应的风险评估依据以及本节判断矩阵所计算的权重得到相应量化值,最终得到一个指标及权重分配表如表9所示。

4 山区桥梁水毁风险评估案例分析

根据第2、3节内容,可将基于云模型评估桥梁水毁风险的过程分解为以下4个步骤:首先,基于文献资料与工程实践,识别桥梁水毁的关键影响因素,并构建相应的风险评语集以明晰各风险等级的定性描述;其次,依据层次分析法构建目标层、一级指标层、二级指标层三级结构,通过两两比较法形成判断矩阵,计算并经一致性检验后获得各风险指标的权重分布;随后,结合桥梁现场勘测数据和规范要求,采用正态分布模拟专家打分样本,并利用逆向云发生器根据样本数据反演各二级指标的云模型数值特征;最后,以所得云数字特征为参数,应用正向云发

表9 指标权重分布				
一级指标层	一级权重	二级指标层	二级权重(局部)	全局权重
水文条件 A ₁	20%	设计防洪标准 B ₁	14%	2.8%
		水流流速 B ₂	26.9%	5.4%
		水深 B ₃	5.1%	1.0%
		水流漂浮物 B ₄	26.9%	5.4%
		水流含沙量 B ₅	26.9%	5.4%
桥墩条件 A ₂	60%	桥墩混凝土结构 B ₆	59.4%	35.6%
		墩型 B ₇	16%	9.6%
		桥墩基础冲刷程度 B ₈	16%	9.6%
		水流交角 B ₉	8.6%	5.2%
环境条件 A ₃	20%	河床土质构成 B ₁₀	24.9%	5.0%
		河床植被覆盖 B ₁₁	6.4%	1.3%
		河道几何形态 B ₁₂	11.1%	2.2%
		河床坡度 B ₁₃	32.7%	6.5%
		人为影响 B ₁₄	24.9%	5.0%

生器分别生成各二级指标的评价云图及整体风险综合评价云图,并通过隶属度比较,识别最不利影响因素,最终完成桥梁整体水毁风险等级的量化评定。本节应用云模型方程对某山区桥梁开展水毁风险评估。

4.1 某山区桥梁参数

某山区桥梁所在河段长 88.3 km,流域面积 6 212 km²,局部平均比降约 1.2‰,设计洪水频率为 1%。50 年一遇洪峰流量 15 100 m³/s、水位 470.51 m,100 年一遇洪峰流量 16 400 m³/s、水位 471.45 m。桥墩为圆端形混凝土墩,流速取 4.53 m/s。

4.2 基于云模型的二级指标云图建立

根据现场条件及既有经验,对该桥采用正态分布函数模拟 30 组专家打分数据,并模拟逆向云发生器,得二级风险指标数字特征如表 10 所示。

表10 二级风险指标数字特征			
指标	E_x	E_n	H_e
B1	14.700 0	4.948 6	1.112 9
B2	43.100 0	3.713 5	0.493 6
B3	52.233 3	2.769 7	1.294 4
B4	12.733 3	3.757 0	0.937 1
B5	27.300 0	4.889 5	2.146 3
B6	36.633 3	3.536 6	1.064 1
B7	37.166 7	5.049 7	2.005 2
B8	46.300 0	2.279 2	0.878 5
B9	11.566 7	4.308 7	1.431 3
B10	37.333 3	4.570 5	1.318 1
B11	12.033 3	4.358 4	0.911 6
B12	39.700 0	3.669 8	0.875 3
B13	26.033 3	3.039 7	0.852 5
B14	29.700 0	5.198 2	0.940 9

依据云数值特征,利用正向云发生器,根据式(4)可以得到各二级指标的云图,其中桥墩结构因素对于山区桥梁水毁影响最大,桥墩混凝土结构和基础冲刷程度是关键风险因子。而环境因素也相较于普通桥梁具有更大影响力,尤其是河床坡度,其二级指标云图,如图2所示。

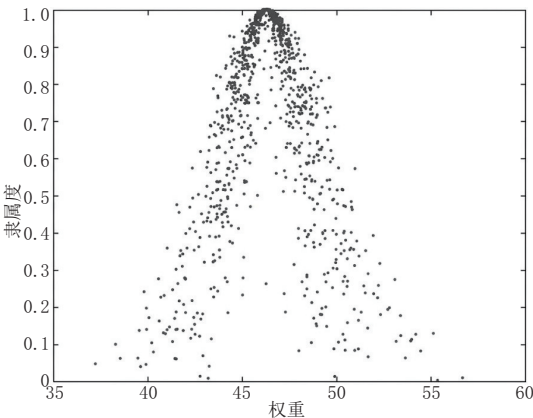


图2 河床坡度二级指标云图

4.3 评估结果分析

按权重计算所有二级指标后最终得到综合云数值特征: E_s 为33.152 5、 E_n 为3.932 5、 H_e 为1.166 8。根据综合云数字特征由正向云发生器推得综合云图,与预先构建的4级风险评语云图进行隶属度对比,以确定最符合的风险等级,如图3所示。

由于云模型中隶属度本身具有随机性,为提升评估结果的稳定性,通常需要多次运行正向云发生器并取隶属度的均值。本例中对综合云与各风险等级云图进行了2 000次模拟,得到综合云对于各风险等级的平均隶属度分别为:轻微风险约0.002 7、中等风险约0.548 9、较高风险约 2.23×10^{-5} 、重度风险约 6.53×10^{-18} 。根据最大隶属度原则^[15],综合云对“中等风险”评语云具有最高隶属度,故该桥的综合水毁风险等级评定为中等风险。

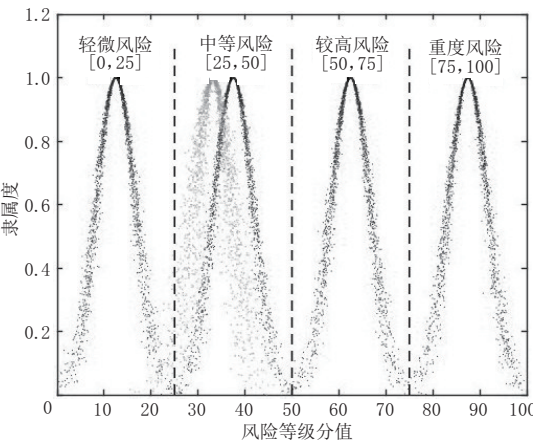


图3 综合评价云图风险对比图

5 结 论

本研究针对山区复杂环境下桥梁水毁风险,构建了基于云模型的评估框架,为理解和应对山区桥梁水毁特有的多耦合致灾风险提供了量化工具。

(1)将云模型方法应用于山区桥梁水毁风险评估,解决了量化水毁风险模糊性与随机性的问题。

(2)构建的多层次指标体系兼顾水文动力、桥梁工程及地质环境的多要素协同作用,基于山区环境,有针对性地选取某些指标因素、增加部分指标权重。

(3)通过逆向云发生器与多次模拟验证,提高了评估结果的可信度。研究结果为桥梁防洪设计与养护决策提供了科学依据,但未来需进一步优化云模型参数设定,并扩展案例验证范围以提升普适性。

(4)对于评估结果为重度风险的桥梁,建议后续进行专项结构验算,引入抗推刚度等力学指标进行精确诊断。

参考文献:

[1] 王飞,杜建坡,李秀芬.桥墩局部冲刷水毁灾害危险性评估研究[J].水电能源科学,2015,33(11):108-111.

[2] 白子培,陈洪凯,张智洪.四川省公路水毁环境区划初探[J].重庆交通学院学报,1993,12(1):50-55.

[3] 李家春,董卫卫,崔娥,等.山区公路水灾害评价体系框架的研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(2):259-263.

[4] 曾蓉,李俊业,王宝亮.基于熵权的模糊综合评价法在公路洪灾风险评价中的应用[J].地质灾害与环境保护,2010,21(3):83-87.

[5] 武永峰,张勇,陈鲜艳,等.湖南省公路交通暴雨风险评价研究[J].自然灾害学报,2011,20(5):148-154.

[6] 林孝松,陈洪凯,王先进,等.重庆市涪陵区G319公路洪灾风险评估研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):244-250.

[7] 齐洪亮,田伟平,李家春.山区沿河路基水毁灾害风险定量评价方法[J].自然灾害学报,2014,23(2):271-277.

[8] 杨栓成,魏学利,陈宝成,等.中巴公路奥-布段水毁灾害及风险性评价研究[J].人民长江,2019,50(9):35-41.

[9] 刘卫民,郭冠森,蔡庆娥,等.基于信息量模型的进藏公路灾害风险区划[J].中外公路,2025,45(1):11-20.

[10] 李海文,鲍学英.基于动态权重-二维云模型的川藏铁路桥梁施工风险评估[J].铁道科学与工程学报,2021,18(6):1650-1660.

[11] 张彦飞,姚杰,刘冉,等.基于正态云模型的混凝土桥梁耐久性评估[J].四川建材,2023,49(11):174-177.

[12] 王连广,姚博,高海洋,等.基于云模型改进AHP的桥梁施工风险评估[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(2):118-125.

[13] 洪泽水,廖国威,龙章彪,等.基于灰色关联度-云模型的铁路斜拉桥施工安全风险评估研究[J].交通节能与环保,2024,20(增刊2):146-154.

[14] Lidy, Liucy, Ganwy. A new cognitive model: cloud model[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(3): 357-375.

[15] 赵欣,沈大娟.基于云模型的公共航空运输企业运行安全风险