

# 基于改进可拓理论-有效降雨耦合模型的 库岸滑坡稳定性动态评价

段军邦<sup>1</sup>, 吕耀成<sup>2</sup>, 李建波<sup>1</sup>, 张国盛<sup>1</sup>, 韦建溪<sup>1</sup>

(1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司, 西宁 810003;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710100)

**摘要:**库区滑坡稳定性问题是水利水电工程中研究的关键问题之一,影响滑坡稳定性的指标具有差异性、时变性,传统方法难以实现稳定性的动态评价。通过改进可拓理论,建立多层次、多变量的滑坡稳定性动态评价模型,引入有效降雨模型替代日降雨量模型,采用差异系数替代传统 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法标准差,建立基于关联函数矩阵的动态权重计算方法。通过对羊曲水电站库区内某滑坡体地表宏观变形、实时监测数据分析,证明了有效降雨模型的适用性,定义了有效降雨作用期,最终将改进可拓理论与有效降雨模型联用对该滑坡体进行稳定性动态评价,研究结果与监测数据表明规律具有较好的一致性,证明提出的方法具有可靠性及准确性。此外,构建的模型可以快速分析现场实时数据,实现随时间、环境变化的滑坡稳定性状态的动态评价,为滑坡体防治工作提供了一种客观准确的分析方法。

**关键词:**滑坡稳定性;改进可拓理论;有效降雨模型;差异系数;动态权重

**中图分类号:**TD12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)22-0253-09

滑坡具有灾难性的后果,造成了大量重大财产损失和人员伤亡<sup>[1]</sup>,自意大利瓦伊昂库区滑坡发生后,库岸滑坡问题成为国内外工程界研究的热点问题<sup>[2]</sup>。近年来我国水利工程大规模兴起,工程建设不可避免地面临滑坡灾害问题,对库区居民生命财产安全及工程的安全建设运行构成了严重威胁,因此开展库岸滑坡稳定性研究,对工程安全建设运行、保障库区人民生命财产安全极具安全意义及应用价值。

滑坡稳定性受诸多因素的影响,数学模型因其模型简单、多层次、量化的特点,被国内外学者广泛应用于滑坡稳定性研究中。Padmaja 等<sup>[3]</sup>基于尖点突变理论,研究了降雨对滑坡稳定性的影响;王富良和李宗发<sup>[4]</sup>从对滑坡地质条件、岩土性质调研的基础上,采用模糊综合评价法对大石滑坡稳定性进行了研究;吴云等<sup>[5]</sup>采用模糊数学与数值模拟相结合的方式,对某滑坡稳定性进行研究;江文金等<sup>[6]</sup>提出了一种基于时间序列和时间卷积网络(time

convolution network,TCN)的滑坡位移预测模型,并在八门子滑坡中应用,验证了该模型在处理长时间序列的适用性;何万才等<sup>[7]</sup>构建了 WOS-SVM(weight of evidence-support vector machine)耦合模型,对威信县进行了滑坡易发性评价;徐卫亚等<sup>[8]</sup>结合监测数据及滑坡变形特征,构建了基于云模型和改进 D-S(Dempster & Shafer)证据理论的滑坡稳定性评价体系,并以周家滑坡验证了该模型的适用性;陈忠源和戴自航<sup>[9]</sup>采用改进云模型,对多个库区岸坡进行了稳定性评价,并与岩体质量分级方法(CSMR 法)和边坡实际状态进行对比验证,证明了该模型的可靠性。这些研究均以其客观评价滑坡稳定性、弱化人为主观因素对稳定性评判结果的影响,降低了库岸滑坡潜在危害性。

综上所述,虽然国内外学者建立了综合多种因素的评价模型,但影响滑坡稳定性的因素具有典型的时变性,难以确定其随着时间发展的相互影响程度及层次结构关系,为建立影响因素的关联性提出

**收稿日期:**2023-08-30

**基金项目:**国家电力投资集团公司科技项目(2020-032-HHS-KJ-X)。

**作者简介:**段军邦(1982—),男,青海乐都人,青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司,副总经理,高级工程师,研究方向为水电能源与地质工程;通信作者吕耀成(1981—),男,甘肃会宁人,中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司地质勘测工程院,主任工程师,正高级工程师,硕士,研究方向为岩土工程勘察、水利水电工程地质。

了挑战;此外,针对随时空变化的影响因素变权研究模型较为欠缺,众多研究通常以常规赋权手段进行时间上的多次运算,忽略了稳定性影响因素随时间发展的多变性。

基于此,本文通过综合考虑影响库岸滑坡稳定性的多种因素,建立滑坡稳定性动态评价体系,在传统可拓理论的基础上,通过对其计算步骤、权重计算方法进行改进,并引入有效降雨模型,建立一套基于实时测取数据分析的库岸滑坡稳定性动态评价模型,以期为滑坡减灾、防治工作提供参考。

## 1 滑坡稳定性多指标评价体系的建立

滑坡稳定性受内在、外在因素的共同控制,这些因素间相互作用,关系错综复杂,且具有时变性,使得滑坡整体安全的动态评价成为一项复杂且重要的系统问题,建立一个全面合理、科学可行的评估体系是实现滑坡稳定性评价的基础。

结合相关规范<sup>[10]</sup>,初步确定从力学性质、地形地貌、外部环境、安全监测 5 个方面选取评价指标。为使评价体系及结果具有简便性、高效性、精准性,征求该领域专家意见后,最终确定选取黏聚力、内摩擦角、重度、平均坡度、坡高等 7 个评价指标建立滑坡稳定性评价体系(图 1)。

为使评价体系能清晰、准确地反映滑坡稳定性状态,结合相关研究成果<sup>[11-14]</sup>,将评价指标量化,并将其划分为极稳定、稳定、基本稳定、不稳定、极不稳定 5 个安全等级,如表 1 所示。

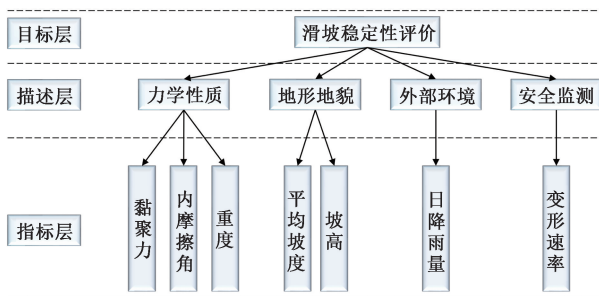


图 1 滑坡稳定性评价体系

表 1 滑坡稳定性等级划分

| 评价指标                       | 安全等级划分 |         |         |         |         |
|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                            | I      | II      | III     | IV      | V       |
| 黏聚力/kPa                    | 60~100 | 45~60   | 30~45   | 15~30   | 0~15    |
| 内摩擦角/(°)                   | 33~55  | 28~33   | 23~28   | 18~23   | 0~18    |
| 重度/(kN·m <sup>-3</sup> )   | 23~24  | 22~23   | 21~22   | 20~21   | 0~20    |
| 平均坡度/(°)                   | 0~15   | 15~25   | 25~35   | 35~45   | 45~90   |
| 坡高/m                       | 0~170  | 170~200 | 200~230 | 230~260 | 260~500 |
| 日降雨量/mm                    | 0~20   | 20~40   | 40~60   | 60~100  | 100~150 |
| 变形速率/(mm·d <sup>-1</sup> ) | 0~0.2  | 0.2~0.3 | 0.3~0.5 | 0.5~1.0 | 1~2     |

## 2 滑坡稳定性评价模型

### 2.1 改进物元可拓理论

基于可拓集合论,根据评估指标体系确定待评物元的经典域与节域,计算评估指标关于不同稳定性等级的关联度,确定待评对象稳定性等级。

1)经典域物源。

根据稳定性评价体系中的描述层所包含的评价指标,建立经典域物元公式为

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $N_j$ 为稳定性评价等级; $C_i$ 为评价指标; $(a_{ji}, b_{ji})$ 为待评指标量值范围。

2)节域。

整合整个经典域的量值范围,可建立节域,具体表示为

$$R_p = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $P$ 为全部稳定性等级; $a_{pi}, b_{pi}$ 为评价指标在全部稳定性等级下的取值范围。

3)待评物元。

对滑坡稳定性评价的描述层待评物元表示为

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & v_1 \\ & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $N$ 为滑坡稳定性安全评价描述层待评对象; $v_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )为待评对象  $C_i$  的实际取值。

4)关联函数计算。

根据可拓理论关联函数的定义,各待评指标均应计算其与不同稳定性等级的关联函数,则第  $i$  个待评指标关于第  $j$  个稳定性等级的关联度为

$$K_j(v_i) = \frac{\rho(v_i, V_{ji})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{ji})}, v_i \notin V_{ji} \quad (4)$$

$$K_j(v_i) = -\frac{\rho(v_i, V_{ji})}{|V_{ji}|}, v_i \in V_{ji} \quad (5)$$

式中: $\rho(v_i, V_{ji})$ 、 $\rho(v_i, V_{pi})$ 分别为点评指标  $v_i$  与评价体系区间  $V_{ji}$ 、 $V_{pi}$  的距离,其具体计算公式如式(6)、式(7)所示。

$$\rho(v_i, V_{ji}) = \left| v_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \quad (6)$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (7)$$

5) 稳定性等级及其变量特征值。

待评滑坡在各稳定性等级下的综合关联度为

$$K_j(R_k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_j(x_i) \quad (8)$$

式中:  $\lambda_i$  为所求的待评价指标  $i$  的权重值。

根据式(8)可求得待评对象在不同稳定性级别下的综合关联度, 据最大隶属度原则可判断滑坡的安全等级, 计算公式为

$$K_j(R_k) = \max K_j(R_k) \quad (9)$$

结合式(8), 可对滑坡稳定性等级变量特征值  $J^*$  进行计算, 具体计算如式(10)、式(11)所示

$$\bar{K}_j(R_k) = \frac{K_j(R_k) - \min K_j(R_k)}{\max K_j(R_k) - \min K_j(R_k)} \quad (10)$$

$$J^* = \frac{\sum_{j=1}^n j \bar{K}_j(R_k)}{\sum_{j=1}^n \bar{K}_j(R_k)} \quad (11)$$

当变量特征值增大后, 预示着滑坡的稳定性有所降低, 失稳风险增大; 反之, 则代表滑坡稳定性增高, 稳定性较好。相较于传统方法, 该方法可更为敏感地反映各指标变化对岸坡稳定性的影响, 并提供精确的量化指标。

## 2.2 改进的 CRITIC 法赋予客观权重

CRITIC 法由 Diakoulaki 等<sup>[15]</sup>在 1995 年提出, 其思想是结合评价指标的对比强度和指标间的独立系数来确定指标客观权重。但该方法在实际使用过程中存在 4 个显著问题: 一是滑坡稳定性评价指标的量纲、数量级不同, 标准差并不能直接反映指标的对比强度<sup>[16]</sup>; 二是安全评价指标间的相关系数有正有负, 绝对值相同的相关系数表征的指标相关性应一致<sup>[17]</sup>; 三是在物元可拓理论使用过程中, 权重系数是针对评价指标多组实测值进行统一计算, 导致不同指标的权重具有唯一性, 但滑坡稳定性属于一个动态系统, 同一指标在不同时刻对稳定性的贡献值存在差异, 即同一指标在不同变形阶段中的权重大小应不同, 采用传统客观确定性权重进行稳定性计算, 因指标权重的唯一性会导致结果的精确不足; 四是采用传统 CRITIC 法计算方式, 当某一评价指标数值大小一致时, 指标无法归一化, 导致无法获得标准化矩阵。

针对上述问题, 对传统 CRITIC 法进行如下改进: ①引入熵权法的差异性系数替代标准差; ②将评价指标的独立性系数计算公式进行修正, 即将

$1 - r_{ij}$  替换为  $1 - |r_{ij}|$ ; ③将关联度函数值引入指标权重计算。

**第一步: 构建决策矩阵。**

对待评价指标, 运用式(4)~式(7)构建关联度函数值矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{kl} & a_{k2} & \cdots & a_{kl} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $a_{kl}$  表示指标第  $k$  个指标在第  $l$  个安全等级下的关联度函数值。

**第二步: 获得标准化矩阵  $A^*$ 。**

$$\text{正向标准化: } a_{ij}^* = \frac{a_{kl} - a_k^{\min}}{a_k^{\max} - a_k^{\min}} \quad (13)$$

$$\text{负向标准化: } a_{ij}^* = \frac{a_k^{\max} - a_{kl}}{a_k^{\max} - a_k^{\min}} \quad (14)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & \cdots & a_{1n}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* & \cdots & a_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1}^* & a_{n2}^* & \cdots & a_{nm}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $a_k^{\max}$  为第  $k$  个指标的最大值;  $a_k^{\min}$  为第  $k$  个指标的最小值。

**第三步: 计算指标的差异系数。**

根据熵权法中熵的概念, 各评价指标的熵为

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{j=1}^n a_{ij}^* \ln a_{ij}^* \right) \quad (16)$$

由式(16)可知, 当  $a_{ij}^*$  等于 0 时, 该式无意义, 故对其进行修正。

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{j=1}^n g_{ij} \ln g_{ij} \right) \quad (17)$$

$$g_{ij} = \frac{1 + a_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n (1 + a_{ij}^*)} \quad (18)$$

指标的差异性系数为

$$G_i = 1 - H_i \quad (19)$$

**第四步: 计算指标相关系数。**利用步骤二中得到的标准化矩阵  $A^*$ , 利用统计学概念计算评价指标的相关系数。

**第五步: 计算评估指标的独立性。**

$$n_i = \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (20)$$

**第六步: 计算指标综合信息量。**

$$C_i = G_i \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (21)$$

**第七步: 计算各评价指标权重系数。**

$$w = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (22)$$

### 3 滑坡实例

#### 3.1 滑坡区概况

滑坡位于羊曲电站库区的河流左岸。区内受高原大陆性气候影响,降雨主要集中于5~9月,具有集中降雨分布特征,多年平均降水量为403.8 mm。滑坡区岸坡高陡,坡度为40°~60°,相对高差达300~400 m,前缘局部残留Ⅱ级阶地的基座面,高出河水面15~20 m;后缘高程在3 100 m以上可见第三级湖积阶地,地形较平坦、开阔;区内地层主要为二叠系下统深灰色千枚状板岩,岩层产状为NW290°~325°/NE∠50°~70°,属单斜构造,发育有小规模断层(图2)。据现场调查,该滑坡所在岸坡坡体结构较为复杂,以中部F6断层为界,其上游侧出露岩层走向与边坡走向夹角为25°~40°,属于顺向坡层状斜坡,下游侧岩层走向与河谷边坡走向夹角为55°~72°,属于斜向倾外一横向层状。

滑坡平面上呈前缘窄、中后部宽的“撮箕”状(图2)。后缘最高接近坡顶平台部位,具有明显的滑坡壁;两侧边界受F14、F17断层控制,发育有冲

沟;地形上总体呈上陡、中缓、下陡的特征,上部坡度为40°~45°,中部坡度为32°~40°,下部坡度为45°~50°(图3);前缘剪出口高程为2 620~2 630 m,位于Ⅱ级阶地基座附近;滑坡体积约为535×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,属大型岩质滑坡。滑体物质主要由浅表部的崩坡积、道路修建的人工弃渣及下部的滑坡堆积的块碎石土组成;滑带物质为褐黄色泥质软弱夹层、含泥砾质土,擦痕清晰。滑坡体因后期改造,完整性较差,表部发育有多条冲沟,以F<sub>6</sub>断层部位规模最大,延伸最长,且对滑坡上下游有明显的分界现象,上游区坡体相对较完整,冲沟较不发育,下游区冲沟较发育,岸坡滑坡表面形态多被破坏。按滑坡的地形地貌特点、坡体结构特征,以F6断层为界,将该滑坡划分为Ⅰ、Ⅱ两个区(图3)。

#### 3.2 滑坡变形特征

##### 3.2.1 滑坡的宏观变形特征

滑坡的宏观地表变形主要以地表拉裂变形、浅表层塌滑变形为主。地表拉裂变形以拉裂缝形式展现,早在2005年后缘公路外侧坡体发生明显沉陷[图4(a)],2009年,公路外侧形成高差0.4~0.5 m的下错台阶[图4(b)],2021年后缘公路外侧安全墙明显破坏[图4(c)]。滑坡的浅表层塌滑破坏主要集中于滑坡后缘、局部冲沟两侧及滑坡前缘地带,

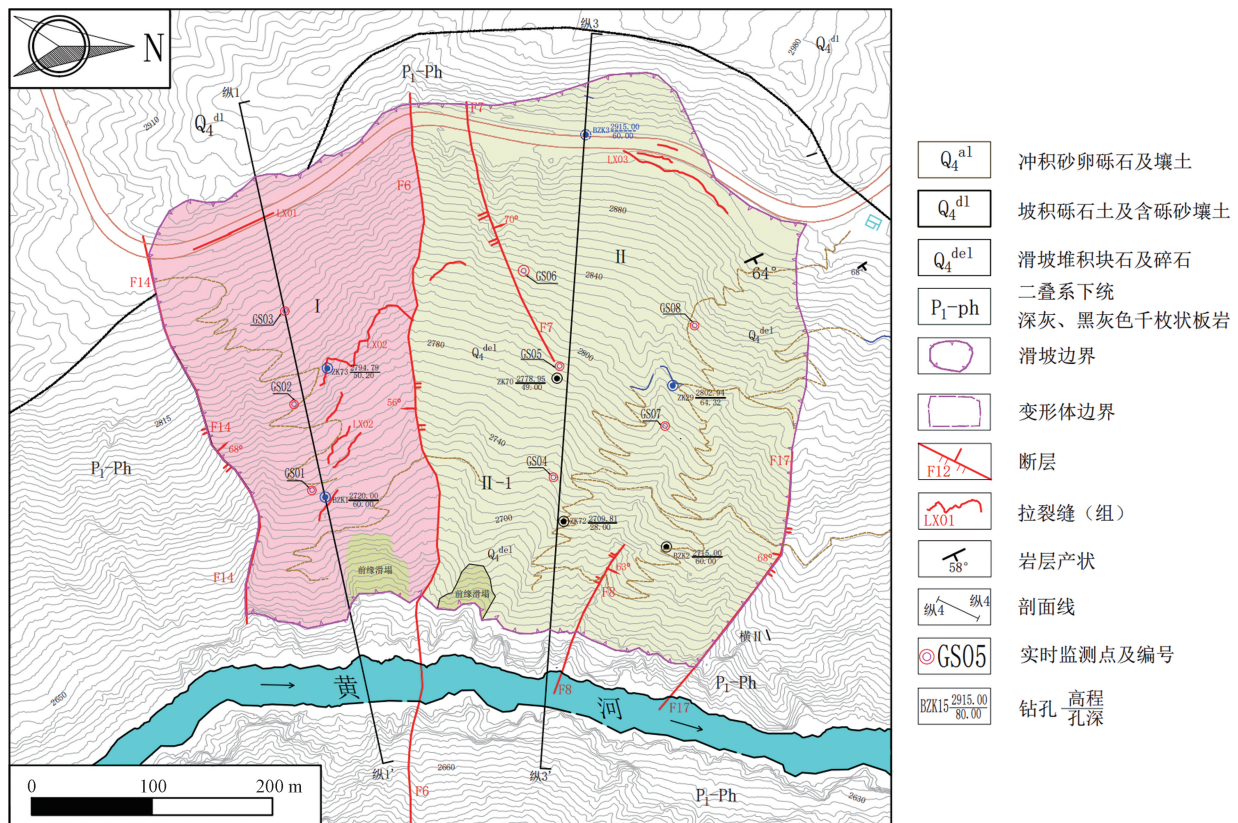


图2 工程地质平面

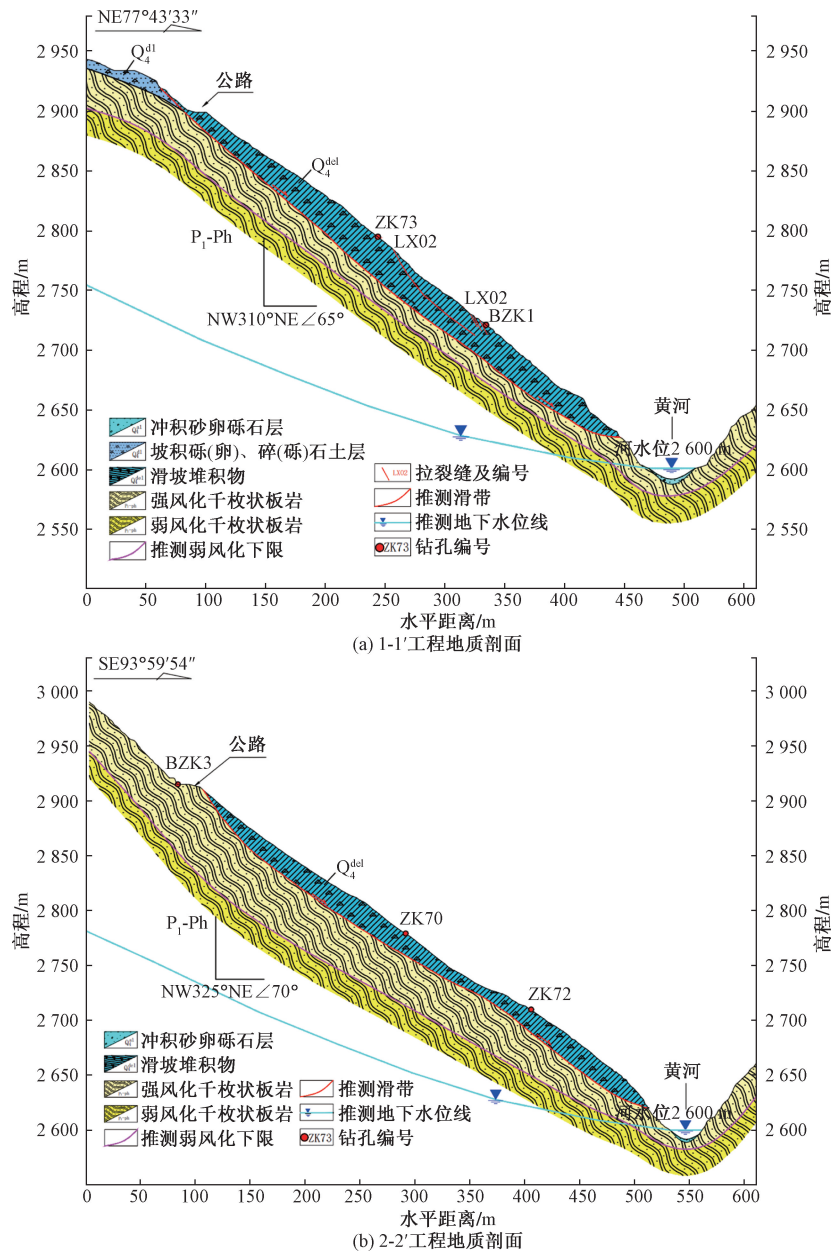


图3 工程地质剖面

主要受临空地形、流水的侵蚀、降雨等形成的小型  
的塌滑破坏,如图4(d)所示。

### 3.2.2 滑坡变形监测成果分析

由图5可知,该滑坡处于持续变形阶段,为定量把握坡体变形特征,滑坡区于2016年10月布置了实时自动GNSS测点,开始了滑坡的变形监测。结合监测成果、区内的降雨特征,绘制滑坡累积变形-降雨图(图5)。从图5可知,滑坡区的变形总体呈渐进增大的趋势,截至2020年11月,Ⅱ区滑坡体的变形明显大于Ⅰ区滑坡体;每年5—9月,位移量较其他月份增加速度明显加快,说明区内集中降雨对坡体变形有促进作用。

## 3.3 滑坡稳定性评价

### 3.3.1 降雨-变形速率分析

结合区内变形特征可知,坡体的变形与降雨密切相关,由区内降雨特征(图5)可知,2018年8月为区内监测时期最大降雨时段,该时段降雨主要集中于下半月,为进一步分析滑坡变形与降雨的关系,以GS08监测点为例,绘制降雨-变形速率关系曲线(图6)。从图6可知,变形速率与降雨具有较好的响应关系,强降雨期位移速率明显增大,同时降雨对当前和其后一定时间内的滑坡变形均有影响,如图中的2018年8月19日未降雨,但该日以前经历了2次强降雨过程,致使该日位移速率仍较大,8月



图4 宏观地表变形破坏特征

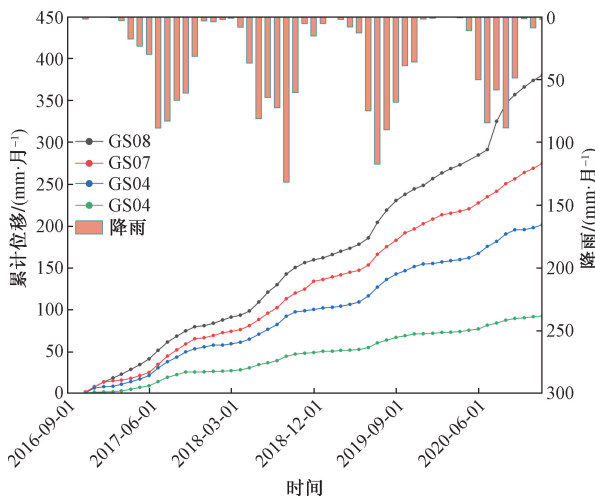


图5 累计位移-降雨关系曲线

20 日区内又一次经历了降雨,其雨强明显小于前期 2 次降雨,但位移速率仍较大,说明降雨对滑坡变形的作用具有一定的滞后效应。

变形滞后现象的出现主要有两个方面:一是因为降雨入渗至滑带位置需要一定的时间,同时其沿滑带产生的场压力消散易需要时间;二是当前期降雨引起滑坡变形速率明显加快后,即便后期降雨量较小,易会对当前坡体进行补给,进而加快滑坡变形速率。

综上可知,滑坡变形也受前期降雨的影响,为准确把握滑坡体稳定性的动态变化,应综合考虑当日降雨与前期降雨对滑坡体的作用,同时考虑降雨随时空变化的衰减效应,故采用 Crozier<sup>[18]</sup> 提出的有效降雨模型:

$$R_c = R_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i \quad (23)$$

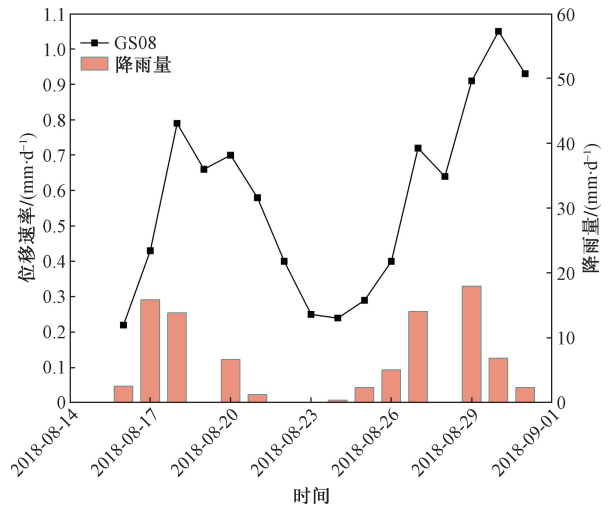


图6 降雨-变形速率关系曲线

式中: $R_c$ 为有效降雨量; $R_0$ 为当日降雨量; $R_i$ 为前期降雨量; $\alpha_i$ 为降雨衰减系数。

考虑到衰减系数的时变性,进行衰减系数计算<sup>[19]</sup>

$$\alpha_i = e^{-\frac{d}{4.34}} \quad (24)$$

式中: $d$ 为前期降雨距离当次降雨的天数间隔。

由图 6 可知,前期降雨对滑坡变形的作用具有期限性,即当达到某一时间期限后,滑坡变形速率回归至相对平稳阶段,说明前期降雨因衰减作用对后续滑坡变形影响可忽略不计。故定义滑坡速率明显变化的最前次降雨至变形平稳阶段内的滑坡变形速率最低点为一次“有效降雨”,具体如图 7 所示。

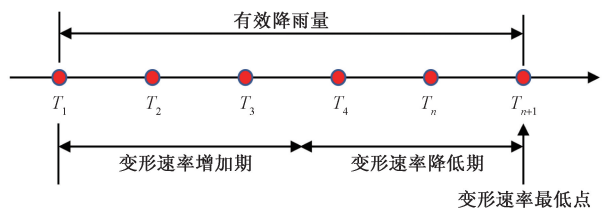


图7 多次降雨构成有效降雨

### 3.3.2 基于改进可拓理论的滑坡稳定性评价

结合前述可知,滑坡变形与降雨密切相关,为动态评价滑坡的稳定性状态,结合有限降雨模型,可将图 6 大致划分为两个有效降雨作用阶段:第一阶段为 8 月 16—24 日;第二阶段为 8 月 25—31 日,具体计算取值指标如表 2 所示。

选取表 2 中的评价指标依据式(3)建立不同阶段不同日期的待评物元矩阵,依据式(4)~式(7)建立关联函数矩阵,在此基础上基于改进的 CRITIC 法计算动态指标权重(图 8 和图 9)。

表 2 不同阶段取值指标

| 阶段代号 | 日期         | 黏聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>(°) | 重度/<br>(kN•m <sup>-3</sup> ) | 平均坡度/<br>(°) | 坡高/<br>m | 有效降雨量/<br>mm | 变形速率/<br>(mm•d <sup>-1</sup> ) |
|------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------|----------|--------------|--------------------------------|
| ①    | 2018-08-16 | 50          | 28.81        | 20.5                         | 36           | 400      | 2.60         | 0.22                           |
|      | 2018-08-17 |             |              |                              |              |          | 17.96        | 0.43                           |
|      | 2018-08-18 |             |              |                              |              |          | 28.16        | 0.79                           |
|      | 2018-08-19 |             |              |                              |              |          | 19.27        | 0.66                           |
|      | 2018-08-20 |             |              |                              |              |          | 24.46        | 0.70                           |
|      | 2018-08-21 |             |              |                              |              |          | 20.73        | 0.58                           |
|      | 2018-08-22 |             |              |                              |              |          | 16.56        | 0.40                           |
|      | 2018-08-23 |             |              |                              |              |          | 13.15        | 0.25                           |
|      | 2018-08-24 |             |              |                              |              |          | 10.84        | 0.24                           |
| ②    | 2018-08-25 | 50          | 28.81        | 20.5                         | 36           | 400      | 2.72         | 0.29                           |
|      | 2018-08-26 |             |              |                              |              |          | 7.23         | 0.40                           |
|      | 2018-08-27 |             |              |                              |              |          | 19.86        | 0.72                           |
|      | 2018-08-28 |             |              |                              |              |          | 15.78        | 0.64                           |
|      | 2018-08-29 |             |              |                              |              |          | 30.53        | 0.91                           |
|      | 2018-08-30 |             |              |                              |              |          | 31.15        | 1.05                           |
|      | 2018-08-31 |             |              |                              |              |          | 27.14        | 0.93                           |

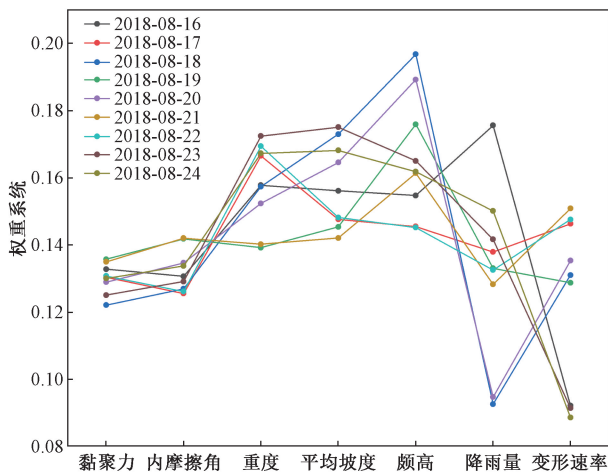


图 8 第一阶段权重系数动态曲线

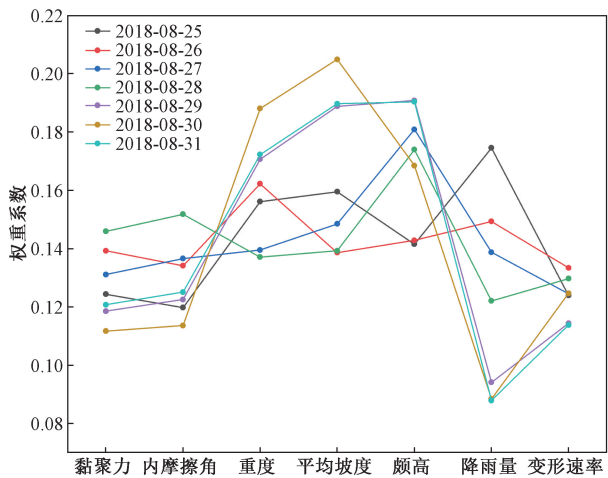


图 9 第二阶段权重系数动态曲线

由图 8 和图 9 可知,每个有效降雨期内不同时间点各评价指标权重系数处于动态变化中,说明不同时期各指标对滑坡变形的贡献率具有时变性。最终结合权重系数得出待评物元综合关联度、稳定性等级、变量特征值如表 3 所示。

由表 3 可知,2018 年 8 月后半月第一阶段有效降雨期,稳定性等级变量特征值由 2.205 3 上升至 3.610 0,最终下降至 2.292 5,即稳定性等级由Ⅱ级上升至Ⅳ级,最终回归至Ⅱ级;第二阶段有效降雨期,稳定性等级变量特征值由 2.432 4 上升至 3.645 3,稳定性等级由Ⅱ级上升至Ⅳ级,说明强降雨期该滑坡体处于不稳定状态,存在失稳风险。两个有效降雨期滑坡体稳定性等级变量特征值的变化规律与表 2 中有与监测成果具有较好的对应关系,有效降雨量越大,变形速率越大,稳定性等级变量特征值越大。基于应用滑坡体实例可知,该稳定性评价模型可以结合滑坡体实时监测数据,动态评价滑坡体稳定性状态及稳定性等级变量特征值,为滑坡防治提供动态数据支持。

4 结论

本文结合滑坡体特点,综合考虑影响滑坡体稳定性的多种因素,采用改进可拓理论-有效降雨模型相结合方式,建立了一套滑坡体稳定性动态评价体系,得出的主要结论如下。

1)与传统可拓理论相比,新模型对指标权重计算方法进行了改进,引入差异系数替代传统 CRIT-IC 法中的标准差,更为显著地反映各评价指标的对比强度,提高指标权重计算的精准性。

表 3 不同阶段关联度与稳定性等级

| 阶段代号 | 日期         | $K_1$    | $K_2$    | $K_3$    | $K_4$    | $K_5$    | 稳定性等级 | 变量特征值   |
|------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|---------|
| ①    | 2018-08-16 | -0.256 1 | -0.255 9 | -0.326 2 | -0.277 1 | -0.322 3 | Ⅱ     | 2.205 3 |
|      | 2018-08-17 | -0.301 2 | -0.165 7 | -0.156 8 | -0.164 0 | -0.276 7 | Ⅲ     | 3.115 0 |
|      | 2018-08-18 | -0.381 2 | -0.170 0 | -0.225 8 | -0.070 9 | -0.153 7 | Ⅳ     | 3.612 6 |
|      | 2018-08-19 | -0.324 4 | -0.175 2 | -0.242 8 | -0.132 2 | -0.221 8 | Ⅳ     | 3.472 3 |
|      | 2018-08-20 | -0.367 1 | -0.173 7 | -0.225 4 | -0.081 1 | -0.177 6 | Ⅳ     | 3.581 5 |
|      | 2018-08-21 | -0.329 5 | -0.159 4 | -0.219 6 | -0.134 0 | -0.240 9 | Ⅳ     | 3.359 1 |
|      | 2018-08-22 | -0.292 0 | -0.170 6 | -0.136 2 | -0.171 0 | -0.280 2 | Ⅲ     | 3.056 7 |
|      | 2018-08-23 | -0.256 8 | -0.142 9 | -0.255 8 | -0.208 0 | -0.268 7 | Ⅱ     | 2.579 3 |
|      | 2018-08-24 | -0.227 5 | -0.167 5 | -0.271 9 | -0.225 5 | -0.282 5 | Ⅱ     | 2.292 5 |
| ②    | 2018-08-25 | -0.265 4 | -0.256 1 | -0.294 7 | -0.264 5 | -0.336 5 | Ⅱ     | 2.432 4 |
|      | 2018-08-26 | -0.250 3 | -0.230 1 | -0.186 3 | -0.210 5 | -0.303 6 | Ⅲ     | 2.742 1 |
|      | 2018-08-27 | -0.330 9 | -0.178 3 | -0.250 4 | -0.121 2 | -0.211 7 | Ⅳ     | 3.525 6 |
|      | 2018-08-28 | -0.302 0 | -0.187 3 | -0.245 5 | -0.142 0 | -0.226 5 | Ⅳ     | 3.482 7 |
|      | 2018-08-29 | -0.384 6 | -0.164 5 | -0.218 9 | -0.088 9 | -0.139 9 | Ⅳ     | 3.610 0 |
|      | 2018-08-30 | -0.387 8 | -0.176 9 | -0.214 0 | -0.085 1 | -0.128 5 | Ⅳ     | 3.645 3 |
|      | 2018-08-31 | -0.380 1 | -0.177 1 | -0.225 5 | -0.095 4 | -0.138 5 | Ⅳ     | 3.639 2 |

2)引入关联函数构建差异系数-CRITIC法的决策矩阵,解决了传统 CRITIC 法指标相同时决策矩阵无法标准化的计算问题,建立了动态权重计算方法。

3)采用理论分析与有效降雨量模型相结合的方式,揭示了降雨期滑坡变形滞后效应产生的原因,基于降雨-变形速率变化规律,定义了多次降雨的有效降雨作用期。

4)本文提出的方法对该滑坡体稳定性动态评价结果显示,该滑坡体在降雨量较小时处于稳定-基本稳定状态,而连续强降雨时期处于不稳定状态,其评价结果与现场观测结果基本一致。

参考文献

[1] KIRSCHBAUM D,STANLEY T,ZHOU Y. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog[J]. Geomorphology,2015,249:4-15.

[2] ALONSO E E,PINYOLN M. Criteria for rapid sliding I. A review of vaiont case[J]. Engineering Geology,2010,114(3-4):198-210.

[3] PADMAJA S B,REDDY G V N,REDDY ES. Landslide stability analysis using mathematical approach[J]. Materials Today:Proceedings,2022,51:596-599.

[4] 王富良,李宗发. 基于模糊综合评价法对滑坡稳定性的分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):1016-1024.

[5] 吴云,张锐,乐琪浪,等. 基于模糊数学和 Geo-Studio 的滑坡稳定性综合评价[J]. 科学技术与工程,2017,17(23):168-173.

[6] 江文金,冷小鹏,林祥,等. 基于时间序列与时间卷积网络的滑坡位移预测[J]. 科学技术与工程,2023,23(9):3672-3679.

[7] 何万才,赵俊三,林伊琳,等. 基于证据权和支持向量机模

型的威信县滑坡易发性评价[J]. 科学技术与工程,2023,23(15):6350-6360.

[8] 徐卫亚,胡业凡,吴伟伟,等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022(1):59-66.

[9] 陈忠源,戴自航. 水库边坡稳定性评价的改进云模型[J]. 工程地质学报,2020,28(3):619-625.

[10] 中华人民共和国行业标准. 边坡工程勘察规范:YS 5230—96[S]. 北京:中国计划出版社,1996.

[11] 王春燕,王力. 灰色关联的模糊综合评价法在三峡库区巴东段滑坡危险性评价中的应用[J]. 水电能源科学,2019,37(4):131-135.

[12] 高明,贺可强,刘洪华,等. 基于变权重的水库滑坡稳定性模糊综合评价[J]. 科学技术与工程,2022,22(10):3885-3891.

[13] 谈小龙,徐卫亚,梁桂兰. 可拓方法在岩石边坡整体安全评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2503-2509.

[14] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等. 露天矿排土场滑坡的可拓评价预警[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(4):1274-1280.

[15] DIAKOULAKI D,MAVROTAS G,Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems:the critic method[J]. Computers & Operations Research,1995,22(7):763-770.

[16] 王坚浩,王龙,张亮,等. 灰色群组聚类和改进 CRITIC 赋权的供应商选择 VIKOR 多属性决策[J]. 系统工程与电子技术,2023,45(1):155-164.

[17] 张立军,张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. 统计与决策,2015(22):65-68.

[18] CROZIER J. Landslides:causes,consequences and environment[J]. New Zealand Geographer,1989,45(2):93-94.

[19] 朱智杰,卢书强,梅军. 基于有效降雨量的滑坡位移-降雨相关性研究[J]. 长江科学院院报,2022,38(9):1-9.

## Dynamic Evaluation of Reservoir Bank Landslide Stability Based on Improved Extension Theory and Effective Rainfall Coupling Model

DUAN Junbang<sup>1</sup>, LYU Yaocheng<sup>2</sup>, LI Jianbo<sup>1</sup>, ZHANG Guosheng<sup>1</sup>, WEI Jianxi<sup>1</sup>

(1. Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Corporation Limited Engineering Construction Branch, Xining 810003, China;

2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Landslide stability in reservoir area is one of the key problems studied in water conservancy and hydropower engineering. The indicators affecting landslide stability are different and time-varying, and it is difficult to achieve dynamic evaluation of stability by traditional methods. By improving the extension theory, a multi-level and multi-variable dynamic assessment model of landslide stability was established. In the proposed method, the effective rainfall model was introduced to replace the daily rainfall model, the difference coefficient was used to replace the standard deviation of the traditional CRITIC method, and the dynamic weight calculation method based on the correlation function matrix was established. Through analyzing sheep song hydropower station reservoir area within a certain landslide surface macroscopic deformation, real-time monitoring data analysis, the applicability of effective rainfall model was proven, the effective rainfall period was defined, and the extension theory and effective rainfall model coupled dynamic evaluation on the stability of this landslide were eventually improved. The results and monitoring data reflect regularity has good consistency. The reliability and accuracy of the method proposed in this study are proved. In addition, the proposed model can quickly analyze the scene real-time data, implement change with time, environment of dynamic evaluation of landslide stability state for landslide prevention, and control work to provide a kind of objective and accurate analysis method.

**Keywords:** landslide stability; improving extension theory; effective rainfall model; difference coefficient; dynamic weight