

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.009

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

徐卫亚^{1,2}, 胡业凡^{1,2}, 吴伟伟³, 秦创创^{1,2}, 李伟³

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 基于多源信息融合理论, 结合安全监测数据及滑坡变形破坏特征, 构建完善的滑坡安全性评价体系, 应用云模型生成各评价指标隶属度, 采用引入权重系数的改进 D-S 证据理论进行数据融合分析, 建立一种基于云模型和改进 D-S 证据理论的滑坡安全性多指标综合评价模型, 以实现对滑坡安全性的综合评判。以雅砻江卡拉水电站周家滑坡安全评价分析为实例进行研究, 按最大隶属度原则判定周家滑坡的安全状态, 分析表明其整体处于基本稳定状态, B1 区处于不稳定状态, 与实际基本相符。

关键词: 多源信息融合; 云模型; D-S 证据理论; 安全性评价; 周家滑坡; 雅砻江

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)01-0059-08

Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory

XU Weiya^{1,2}, HU Yefan^{1,2}, WU Weiwei³, QIN Chuangchuang^{1,2}, LI Wei³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. POWERCHINA HUADONG Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In this paper, a landslide safety evaluation model is established based on the cloud model and the improved D-S evidence theory. With the basis of multi-source information fusion theory, combined with the safety monitoring data and landslide deformation and damage characteristics, a perfect landslide safety evaluation system is constructed, the cloud model is applied to generate the affiliation degree of each evaluation index, and the improved D-S evidence theory with the introduction of weight coefficients is used for the data fusion analysis to realize a comprehensive evaluation of landslide safety. The safety evaluation analysis of Zhoujia landslide in the Yalong River Kala Hydropower Station is studied as an example, and the safety status of the Zhoujia landslide is determined according to the principle of maximum affiliation. The results show that the whole area is in a basically stable state, while area B1 is in a unstable state, which is basically consistent with the actual status.

Key words: multisource data fusion; cloud model; D-S evidence theory; safety evaluation; Zhoujia landslide; Yalong River

我国西部雅砻江、澜沧江等流域有规模巨大、地质条件复杂的滑坡体或崩坡积体发育, 成因机制和变形破坏机理十分复杂, 滑坡在水动力作用下的安全监测往往构成典型的多指标不确定性系统, 存在着随机性、模糊性和不确定性, 亟需开展基于监测信息的滑坡安全性评价。

针对信息的不确定性问题, 目前常采用多源信息融合法^[1-5]。该方法首先选取评价指标并建立安全评价

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51939004); 国家重点研发计划(2017YFC1501100)
作者简介: 徐卫亚(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: wyxu@hhu.edu.cn
通信作者: 胡业凡(1996—), 男, 硕士, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: 1810913139@qq.com
引用本文: 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, 50(1): 59-66.
XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(1): 59-66.

指标体系;其次通过赋权方法计算各指标权重;最后将不同评价指标融合进行安全性评价。但是,传统的多源信息融合法建立的评价指标体系多以实测数据指标为主,少有同时引入定性指标与定量指标。随着信息技术的发展,对安全性评价方法的要求越来越高。谈小龙等^[6-7]引入可拓理论,基于多指标优化融合的思想,建立基于熵权的可拓学理论,并将其应用于某工程坝基岩体质量评价。Liu 等^[8]利用云模型并引入权重系数,对岩爆分类进行预测。徐健等^[9]应用改进的模糊综合评价法,通过最大隶属度原则的有效度及置信度准则判定水质类别。

证据理论作为一种不确定的推理方法,能够有效处理多个可能冲突的不确定性、模糊性信息的数据融合问题^[10]。李嘉良等^[11]提出一种基于证据理论和熵权灰色关联法的地震滑坡危险性预测模型。杜修力等^[12]考虑专家评语问题,建立基于证据理论的深基坑工程施工风险综合评价模型。郭芝韵等^[13]组合应用云模型和 D-S 证据理论开展大坝安全多指标评估方法研究。但是传统的证据理论存在着一定的缺陷,主要在于各监测指标的取值仅为当期值,无法处理时间序列问题,而滑坡是一个随时间不断变化的体系。

本文基于雅砻江卡拉水电站周家滑坡的地质资料与监测资料,构建完整的指标评价体系,完成专家评语定性指标的定量转化;引入云模型,通过求得的隶属度来确定证据理论中各证据指标基本概率分配函数,克服了证据理论对时间序列数据处理失效的问题;同时,引入权重对传统的证据理论进行改进,建立了滑坡安全性多指标综合评价模型,并将其应用于雅砻江卡拉水电站周家滑坡的安全性评价,结果验证了该模型的合理性。

1 滑坡安全性多指标综合评价模型

基于云模型和 D-S 证据理论,构建滑坡安全性多指标综合评价模型。其思路为:①构建滑坡定性定量指标评价体系;②利用云模型计算定量指标实测时间序列数据对应的隶属度,并将其转化为证据理论的基本概率分配;③完成专家评语定性指标转化为证据理论的基本概率分配;④针对证据理论融合时存在的冲突问题,引入静态权重系数,实现同一监测项目多组监测数据的融合,引入动态权重系数实现不同证据间的融合,从而实现滑坡安全性的多指标综合评价。

1.1 基于云模型的滑坡安全性评价隶属度矩阵计算

云模型是用自然语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型^[14],采用期望值 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个数字特征体现定性概念的不确定性、模糊性和随机性。云模型运用云发生器进行计算,云发生器按功能分为正向云发生器和逆向云发生器^[15]。

对评价指标的安全性等级区间分别建立云模型,即利用正向云发生器计算模型的各特征值(E_x 、 E_n 、 H_e)。 H_e 反映了熵的离散程度,根据经验取 0.01; E_x 、 E_n 公式如下:

$$E_{xij} = \frac{x_{ij}^1 + x_{ij}^2}{2} \tag{1}$$

$$E_{nij} = \frac{x_{ij}^2 - x_{ij}^1}{2.355} \tag{2}$$

式中: (x_{ij}^1, x_{ij}^2) 为某评价指标对应的某安全等级的取值范围;

由各评价指标实测时间序列及上述评价指标分级区间云模型特征值计算第 j 个安全等级下第 i 个指标特征值的隶属度 μ_{ij} :

$$\mu_{ij}(p) = \exp\left(-\frac{(x_p - E_{xij})^2}{2(E'_{nij})^2}\right) \tag{3}$$

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{\mu_{ij}(p)}{N} \tag{4}$$

式中: E'_n 为以 E_n 为期望、 H_e 为标准差的正态随机数; x_p 为时间序列第 p 个实测值。

1.2 基于改进 D-S 证据理论的滑坡稳定性综合评价

1.2.1 变形破坏特征证据化

滑坡变形破坏野外现场特征大多由工程技术人员根据自身知识、现场经验得出,一般用“好”“一般”“差”等较为模糊的定性评价。

评价时等级划分得越多评价结果越准确。但研究表明,人的最佳评判能力是 6~9 个等级^[16]。本文将滑坡变形破坏特征定性评价集定义为 $E = \{\text{很好,好,较好,一般,较差,差,极差}\}$,并对该评价集进行非排他性赋值,见表 1。定义评价等级特征集并赋值如表 2 所示。将给出的模糊语言映射至特征集上,通过模糊处理获得变形破坏特征的量化证据值。

表 1 评价集非排他性赋值

Table 1	Non-exclusive assignment of evaluation set						
$U_{rs}(g)$	1	2	3	4	5	6	7
很好	1.00	0.75	0	0	0	0	0
好	0.25	1.00	0.75	0	0	0	0
较好	0	0.25	1.00	0.75	0	0	0
一般	0	0	0.50	1.00	0.50	0	0
较差	0	0	0	0.75	1.00	0.25	0
差	0	0	0	0	0.75	1.00	0.25
极差	0	0	0	0	0	0.75	1.00

表 2 评价等级特征集赋值

Table 2	Assignment of evaluation grade feature set						
$U_s(A_k)$	1	2	3	4	5	6	7
极稳定(A_1)	1.00	0.75	0	0	0	0	0
稳定(A_2)	0	0.25	1.00	0.50	0	0	0
基本稳定(A_3)	0	0	0.25	1.00	0.50	0	0
不稳定(A_4)	0	0	0	0.25	1.00	0.50	0
极不稳定(A_5)	0	0	0	0	0	0.75	1.00

$U_r(A_k)$ 为专家 r 对指标 g_{ij} 模糊评语的广义隶属度函数:

$$U_{r(g_{ij})}(A_k) = \frac{\sum_{s=1}^7 \min(U_{rs(g_{ij})}, U_s(A_k))}{\sum_{s=1}^7 \max(U_{rs(g_{ij})}, U_s(A_k))}$$

(5)

式中: i 为分目标号($i=1,2,\cdots,\alpha$); j 为分目标中的指标号($j=1,2,\cdots,\beta$); s 为模糊评价语号; k 为特征集号($k=1,2,3,4,5$); $U_{rs(g_{ij})}$ 为专家 r 对指标 g 的模糊评语; $U_s(A_k)$ 为模糊评语评价等级。

1.2.2 基本概率分配的确定

基于云模型得到的评价指标隶属度基本满足基本概率分配的定义,但 $\sum_{j=1}^q \mu_{ij} \neq 1$, 故补充如下定义,将隶属度转化为基本概率分配:

$$\theta_i = 1 - \max(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{iq})$$

(6)

$$m_i(X) = \theta_i$$

(7)

$$m_i(A_j) = (1 - \theta_i) \mu_{ij} / \sum_{j=1}^q \mu_{ij}$$

(8)

式中 $m_i(X)$ 为该指标评价结果为未确知的可能性。

1.2.3 权重系数的确定

1.2.3.1 动态权重系数

对不同的监测项目即不同的证据,采用动态权重系数法确定各证据的权重系数。设共有 n 条证据,定义证据向量:

$$\mathbf{p}_i = (m_i(A_1), m_i(A_2), \cdots, m_i(A_q), m_i(u))^T \quad (1 \leq i \leq n)$$

(9)

任意两向量 $\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j$ 的相容系数:

$$R_{ij} = \cos(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) = \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j}{[\left(\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i\right)\left(\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j\right)]^{1/2}}$$

(10)

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j = \sum_{k=1}^{q+1} m_i(A_k) m_j(A_k) \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(11)

某条证据 m_i 的绝对相容度 $R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{ij}$, 将其归一化得到证据的可信度,因可信度随证据变化而变化,故称之为动态权重系数:

$$w_{i1} = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

(12)

1.2.3.2 静态权重系数

同一监测项目含有多组监测数据,采用静态权重系数方法确定多组数据间的权重系数。为保证权重的相对客观和科学性,尽可能避免主、客观单一赋权带来的不足,采用主观和客观赋权相结合的方法获得静态权重系数。主观赋权采用 DEMATEL 法,客观赋权采用 CRITIC 法。

1.2.4 证据理论融合计算

设 m_1 和 m_2 是两个相互独立的基本概率分配,证据理论组合规则如下:

$$m(C) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=j, A_i \cap B_j \neq \emptyset} [w_1 m_1(A_i)][w_2 m_2(B_j)]}{1 - K} & (\forall C \subset U, C \neq \emptyset) \\ 0 & (C = \emptyset) \end{cases} \tag{13}$$

其中 $K = \sum_{i=j, A_i \cap B_j \neq \emptyset} [w_1 m_1(A_i)][w_2 m_2(B_j)] < 1$

式中: w_1 、 w_2 分别为对应指标的权重; K 表示证据之间的不相容程度。

2 滑坡安全性多指标综合评价流程

步骤 1 选取滑坡安全性评价指标,并构建评价指标体系,确定各评价指标安全等级划分。各评价指标相应标准值不固定,主要根据监测资料总结反馈、工程类比及专家建议得出,存在不确定性,因此采用云模型对安全等级区间进行处理。

步骤 2 利用正向云发生器计算云模型基本参数 E_x 、 E_n 、 H_e ,分别计算滑坡安全性等级区间,并将各指标实测值代入计算隶属度矩阵。

步骤 3 根据计算的隶属度矩阵,由式(6)~(8)将其转化为基本概率分配。

步骤 4 由式(5),完成滑坡变形破坏特征定性指标转化为证据理论的基本概率分配。

步骤 5 分别计算动态权重系数和静态权重系数。

步骤 6 根据动态权重系数和静态权重系数及基本概率分配得到的证据,应用 Dempster 融合准则进行融合计算,得到最终各安全等级对应的基本概率分配,选择最大基本概率值对应的安全等级为安全评价融合决策结果。

滑坡安全性多指标综合评价流程如图 1 所示。

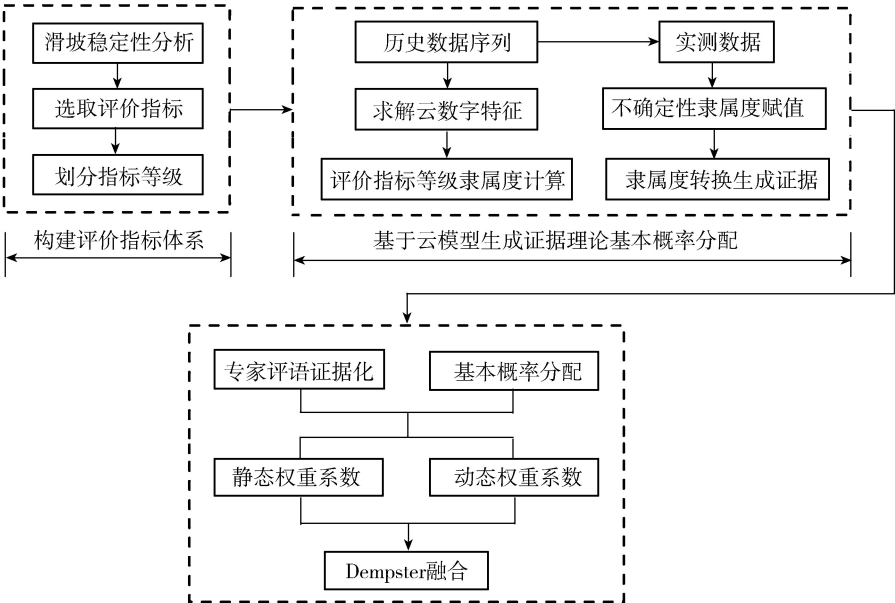


图 1 基于云模型和 D-S 证据理论的滑坡安全性评价流程

Fig. 1 Landslide safety evaluation process based on cloud model and D-S evidence theory

3 实例分析

3.1 工程概况

卡拉水电站是雅砻江干流中游两河口—卡拉河段水电开发规划一库七级的第七级水电站。卡拉坝址河段共分布有9个大型或巨型滑坡体,周家滑坡位于卡拉水电站坝址上游右岸,距坝址9.2~11 km,为一巨型滑坡,滑坡体组成物质、成因复杂,主要由表层崩坡积层(Q4col-dl)、滑坡堆积层(Q3del)和滑带土三部分组成,在滑坡体的中下部以块石层出露较多,上部以砾质粉土、碎石混合土出露较多。滑坡体总体呈不规则的m形展布,上游侧以山脊为界,下游侧以一冲沟为界,后缘至陡缓交界处,前沿直抵雅砻江,上下游宽约1 880 m,前后缘长680~1 200 m,分布面积152.5万m²,平均厚度52.22 m,其中最大垂直揭露厚度115.70 m,总方量约7 964万m³。

按底滑面形态、地形、物质组成将周家滑坡分为A区、B区,后部为A区,前部为B区;B区滑坡体中部分布一条较大冲沟,将其分为上下游两部分B1、B2区,两区之间联动性不大,如图2所示。滑坡体表层蠕滑变形区主要分布于滑坡体中下部的临江岸坡和深切冲沟两侧,主要分布在高程2 200 m以下。后缘无拉张裂缝产生,坡体中部无较大纵张裂缝、错台发育。滑坡体B1区几条规模较大的冲沟两侧有垮塌带分布;B1区前缘因河流凹岸侵蚀底部被掏空,局部产生二次塌滑向江边推进,造成滑坡堆积物覆盖在河床砂卵石层之上,塌滑区呈狭长形U形。

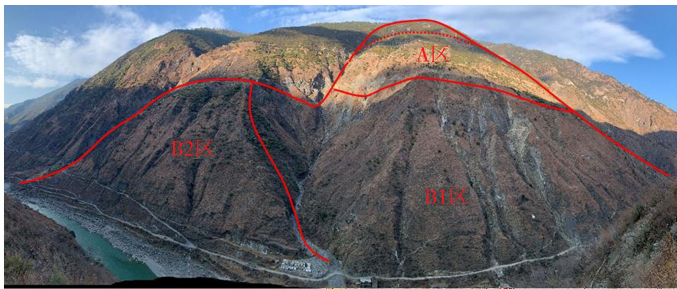


图2 周家滑坡分区
Fig.2 Division of Zhoujia landslide

周家滑坡体规模巨大,若出现滑坡失稳,可能造成涌浪、堵江和水库淤积等灾害,威胁大坝施工期及运行期工程安全及环境安全。因此,多滑坡发育是卡拉水电工程显著的地质特征,也是控制工程安全的决定性因素。

3.2 周家滑坡监测布置

为全面监控周家滑坡体的稳定性状况,对周家滑坡开展了系统的安全监测,以表面位移为主,深层变形为辅,兼顾滑坡变形破坏特征调查。布置1-1、2-2、3-3、4-4共4个监测断面;表面位移监测布置有16个监测点,包含A区6个GPS测点TSzj1-1~3-2、B1区6个机器人测点TPzj1-1~3-2、B2区3个机器人测点TPzj4-1~4-3;深部位移监测布置有3个测斜孔INzj1-1、3-1、4-1,1套引张线式位移计IDzj2-1。同时,加强对滑坡现场变形破坏特征的巡查,包括裂缝发育分布、局部变形、冲沟垮塌、平硐巡视等。周家滑坡监测布置平面图见图3。

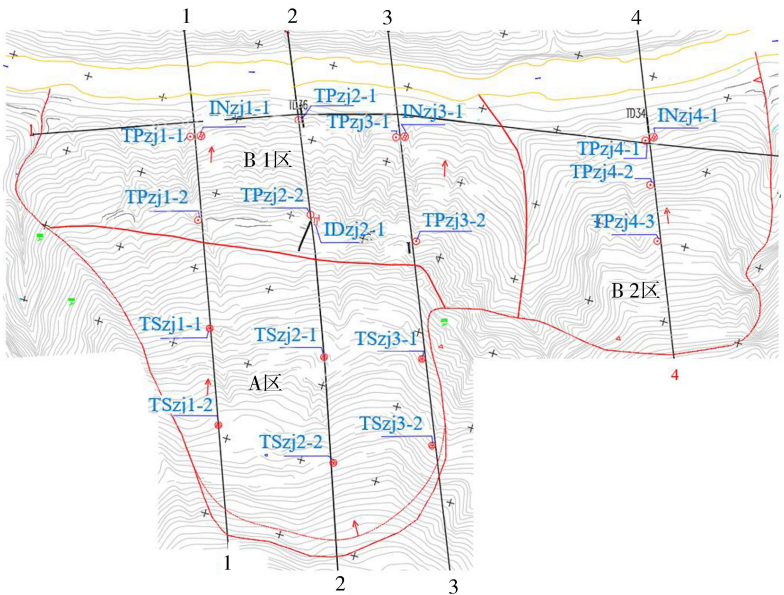


图3 周家滑坡监测平面布置
Fig.3 Monitoring plane layout of Zhoujia landslide

3.3 模型计算

基于监测手段与滑坡现场巡查,建立科学、合理、完备的周家滑坡安全性评价指标体系。主要包含表面位移、深部位移、变形破坏特征3个一级指标以及对应的二、三级指标,具体如图4所示。

将滑坡安全性等级划分为{极稳定,稳定,基本稳定,不稳定,极不稳定}。基于周家滑坡原始监测数据与滑坡特性分析,从表面位移速率、深部位移速率两方面进行定量评价,给出评价指标对应的评价等级范围,见表3。对各指标在不同安全等级下的 E_x 、 E_n 、 H_e 进行计算,结合周家滑坡的实际情况, H_e 取0.01,计算结

果见表4。

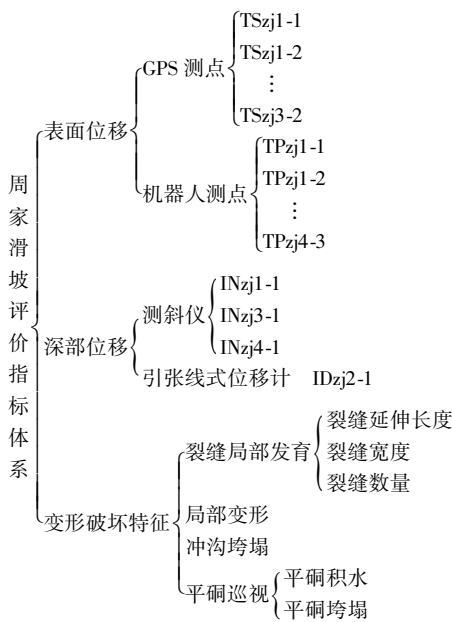


图4 周家滑坡安全性评价指标体系

Fig.4 Evaluation index system of Zhoujia landslide

分别对周家滑坡 B1 区和整体进行安全性评价,限于篇幅只对 B1 区安全性评价过程详细阐明。

根据 2012—2021 年监测数据,利用云模型对周家滑坡 B1 区表面、深部位移监测点速率特征值的隶属度进行计算;再利用证据理论将各指标隶属度转化为基本概率分配,如表 5 所示。

周家滑坡 B1 区有 TD35、TD36、TD37、TD47 共 4 条平硐,其中 TD35、TD37 平硐干燥无渗水,TD36、TD47 平硐渗水量较大,有塌顶现象。B1 区有 4 条季节性冲沟,冲沟侧面直立,有少量崩塌堆积。B1 区后缘及 A 区前缘有多处拉裂缝,其中一条典型裂缝长度为 41.6 m,最大宽度为 52 cm。滑坡变形破坏特征评语为:TD35、TD37 平硐积水好,平硐垮塌好;TD36、TD47 平硐积水较差,平硐垮塌差;局部变形一般;冲沟垮塌较差;长度很差;裂缝分布发育宽度差,数量较差。

针对周家滑坡变形破坏评价指标特征,利用工程技术人员评语证据化理论,将技术人员给出的模糊语言映射至特征集上,通过模糊处理获得专家语言的量化证据值。计算得到各评价指标隶属度,再将其转化为各指标基本概率分配,如表 6 所示。

对不同的监测项目即不同的证据,采用动态权重系数法确定各证据的权重系数。对同一监测项目含有多组监测数据,采用静态权重系数法确定多组数据间的权重系数。

表3 基于监测数据的周家滑坡稳定性分级
Table 3 Stability classification of Zhoujia landslide based on monitoring data

安全性	表面位移速率/ (mm·月 ⁻¹)	深部位移速率/ (mm·月 ⁻¹)
极稳定(Ⅰ)	0~0.5	0~0.1
稳定(Ⅱ)	0.5~1.0	0.1~0.4
基本稳定(Ⅲ)	1.0~3.0	0.4~2.0
不稳定(Ⅳ)	3.0~10.0	2.0~10.0
极不稳定(Ⅴ)	10.0~30.0	10.0~30.0

表4 评价指标稳定性分级区间云模型特征值
Table 4 Characteristic value of cloud model for the stability grading interval of evaluation index

安全性	表面位移速率	深部位移速率
极稳定(Ⅰ)	(0.25,0.212,0.01)	(0.05,0.043,0.01)
稳定(Ⅱ)	(0.75,0.212,0.01)	(0.25,0.127,0.01)
基本稳定(Ⅲ)	(2.00,0.849,0.01)	(1.20,0.679,0.01)
不稳定(Ⅳ)	(6.50,2.972,0.01)	(6.00,3.397,0.01)
极不稳定(Ⅴ)	(20.00,8.493,0.01)	(20.00,8.493,0.01)

表5 评价指标基本概率分配

Table 5 Basic probability distribution of evaluation index

监测点	m(Ⅰ)	m(Ⅱ)	m(Ⅲ)	m(Ⅳ)	m(Ⅴ)	m(U)
TPzj1-1	0.0350	0.0432	0.1483	0.2041	0.0675	0.5019
TPzj1-2	0.0439	0.0398	0.1317	0.1735	0.0680	0.5432
TPzj2-1	0.0226	0.0445	0.1384	0.1847	0.0788	0.5311
TPzj2-2	0.0424	0.0435	0.1385	0.1923	0.0670	0.5164
TPzj3-1	0.0733	0.0911	0.1511	0.0835	0.0392	0.5618
TPzj3-2	0.0696	0.0622	0.1923	0.1219	0.0473	0.5068
INzj1-1	0.0301	0.0447	0.1215	0.1886	0.0876	0.5275
INzj3-1	0.0181	0.0245	0.1102	0.3012	0.1278	0.4182
IDzj2-1	0.0319	0.0709	0.1491	0.1539	0.0362	0.5580

表6 滑坡变形破坏指标基本概率分配

Table 6 Basic probability distribution of landslide deformation failure index

评价指标	m(Ⅰ)	m(Ⅱ)	m(Ⅲ)	m(Ⅳ)	m(Ⅴ)	m(U)
TD35、TD37 平硐积水	0.1655	0.1655	0.0325	0	0	0.6364
TD35、TD37 平硐垮塌	0.1655	0.1655	0.0325	0	0	0.6364
TD36、TD47 平硐积水	0	0.0737	0.2395	0.3193	0.0342	0.3333
TD36、TD47 平硐垮塌	0	0	0.0756	0.2457	0.1787	0.5000
冲沟垮塌	0	0.0737	0.2395	0.3193	0.0342	0.3333
局部变形	0	0.2137	0.5143	0.1470	0	0.1250
裂缝长度	0	0	0	0.1364	0.6136	0.2500
裂缝宽度	0	0	0.0756	0.2457	0.1787	0.5000
裂缝数量	0	0.0737	0.2395	0.3193	0.0342	0.3333

将表面位移 D_1 、深部位移 D_2 、平硐巡视 D_3 、裂缝分布发育 D_4 4 个三级指标分别作为单独的证据体,引入静态权重系数,对各证据体下的四级指标进行两两融合,融合后的结果作为三级指标证据体的基本可信度分配,结果如表 7 所示。

表 7 四级指标融合计算
Table 7 Four-level index fusion calculation

评价指标	$m(I)$	$m(II)$	$m(III)$	$m(IV)$	$m(V)$	$m(U)$
表面位移	0.062 6	0.072 9	0.324 5	0.360 5	0.086 8	0.092 6
深部位移	0.033 0	0.058 5	0.192 8	0.393 4	0.123 5	0.198 8
平硐巡视	0.018 5	0.129 6	0.297 6	0.467 3	0.055 4	0.031 6
裂缝分布发育	0	0.022 4	0.099 0	0.355 5	0.422 0	0.101 2

将 D_1 和 D_2 两个二级指标分别作为单独的证据体,引入动态权重系数,对证据体下的三级指标进行两两融合,融合后的结果为二级指标证据体的基本可信度分配,如表 8 所示。

表 8 三级指标融合计算
Table 8 Three-level index fusion calculation

评价指标	$m(I)$	$m(II)$	$m(III)$	$m(IV)$	$m(V)$	$m(U)$
位移	0.035 5	0.048 9	0.293 1	0.505 5	0.079 7	0.037 2
巡视检查	0.001 1	0.037 9	0.347 4	0.583 4	0.028 3	0.001 9

将两个二级指标进行融合,得到周家滑坡 B1 区及整体安全性评价结果,如表 9 所示。

表 9 周家滑坡 B1 区和整体安全性评价融合决策结果
Table 9 Fusion decision results of safety evaluation of Zhoujia landslide B1 area

区域	$m(I)$	$m(II)$	$m(III)$	$m(IV)$	$m(V)$	$m(U)$
B1 区	0.000 3	0.007 6	0.262 1	0.721 9	0.007 9	0.000 2
周家滑坡整体	0	0.001 1	0.860 4	0.136 5	0.002 0	0

由表 9 可知,周家滑坡 B1 区安全性融合结果最大基本概率 $m(IV)=0.721 9$ ，“不稳定”概率更大,其安全等级判定为“不稳定”;周家滑坡整体安全性融合结果最大基本概率 $m(III)=0.860 4$ ，“基本稳定”概率更大,其安全等级判定为“基本稳定”,与实际情况相符合。由此可见,本文提出的基于云模型和 D-S 证据理论的滑坡安全性多指标综合评价模型具有合理性和可行性。

4 结 论

- a. 基于云模型和 D-S 证据理论的滑坡安全性多指标综合评价模型引入云模型计算监测指标隶属度,对原始数据序列进行深入挖掘,克服了传统证据理论无法处理时间序列问题的痛点;同时,建立的监测指标体系全面考虑定量和定性两个方面,不仅应用现场监测数据,还充分考虑滑坡变形破坏特征,做到了兼顾自动化监测与现场巡查定性评价,使监测指标体系趋于完善。
- b. 通过对周家滑坡 2012—2021 年监测数据及现场巡查定性评价结果进行融合分析,判定周家滑坡整体处于基本稳定状态,B1 区处于基本稳定与不稳定之间,不稳定破坏概率更大,安全裕度较小,需进一步加强安全监测工作,开展预警防控风险管理和灾害链防控应对专题研究。
- c. 工程实例分析表明,基于云模型和 D-S 证据理论的滑坡安全性多指标综合评价模型具有合理性和可行性,为滑坡安全性评价提供了新的方法和思路。

参考文献:

[1] 吴毅江,陈波,阮航,等. 基于改进属性识别模型的塔基山坡稳定性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊 1):3138-3146. (WU Yijiang,CHEN Bo,RUAN Hang,et al. Stability evaluation of hillside under the transmission tower based on improved attribute recognition model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Sup1) :3138-3146. (in Chinese))

[2] 郭子正,殷坤龙,黄发明,等. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(2):287-300. (GUO Zizheng,YIN Kunlong,HUANG Faming,et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide

- classification and weighted frequency ratio model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 287-300. (in Chinese))
- [3] 谈金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827. (ZHANG Jinlong, XU Weiya, JIN Haiyuan, et al. Safety monitoring and stability analysis of large-scale and complicated high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1819-1827. (in Chinese))
- [4] 马福恒, 刘成栋, 向衍. 水库大坝风险综合评价标准及其适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 610-614. (MA Fuheng, LIU Chengdong, XIANG Yan. Comprehensive reservoir dam risk assessment standards and their applicability[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(5): 610-614. (in Chinese))
- [5] YAN Long, XU Weiya, WANG Huanling, et al. Drainage controls on the Donglingxing landslide (China) induced by rainfall and fluctuation in reservoir water levels[J]. Landslide, 2019, 16: 1583-1593.
- [6] 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. (TAN Xiaolong, XU Weiya, LIANG Guilun. Application of extenics method to comprehensive safety evaluation of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2503-2509. (in Chinese))
- [7] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙. 基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 535-540. (LIANG Guilun, XU Weiya, TAN Xiaolong. Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 535-540. (in Chinese))
- [8] LIU Zaobao, SHAO Jianfu, XU Weiya, et al. Prediction of rock burst classification using the technique of cloud models with attribution weight[J]. Nat Hazards, 2013, 68(2): 549-568.
- [9] 徐健, 吴玮, 黄天寅, 等. 改进的模糊综合评价法在同里古镇水质评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 143-149. (XU Jian, WU Wei, HUANG Tianyin, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation to water quality evaluation in Tongli Town[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(2): 143-149. (in Chinese))
- [10] SHAFER G A. Mathematical theory of evidence[M]. Prince-on: Princeton University Press, 1976.
- [11] 李嘉良, 马东辉, 王威. 基于证据理论和熵权灰色关联的潜在地震滑坡危险性评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1730-1736. (LI Jialiang, MA Donghui, WANG Wei. Assessment of potential seismic landslide hazard based on evidence theory and entropy weight grey incidence[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(5): 1730-1736. (in Chinese))
- [12] 杜修力, 张雪峰, 张明聚, 等. 基于证据理论的深基坑工程施工风险综合评价[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 155-161. (DU Xiuli, ZHANG Xuefeng, ZHANG Mingju, et al. Risk synthetic assessment for deep pit construction based on evidence theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 155-161. (in Chinese))
- [13] 郭芝韵, 苏怀智, 刘炳锐, 等. 基于云模型与证据理论的大坝安全综合评估方法[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 99-103. (GUO Zhiyun, SU Huaizhi, LIU Bingrui, et al. Cloud model and evidence theory-based method for comprehensive assessment on dam safety[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(3): 99-103. (in Chinese))
- [14] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 73-79. (LI Deyi. Uncertainty in knowledge representation[J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 73-79. (in Chinese))
- [15] ZHOU Keping, LIN Yun, DENG Hongwei, et al. Prediction of rock burst classification using cloud model with entropy weight[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1995-2002.
- [16] 李子阳, 李涵曼, 李政颢, 李永江. 基于多测点云相似的混凝土坝变形性状关联分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 13-17. (LI Ziyang, LI Hanman, Li Zhengxie, et al. Correlation analysis of deformation behavior of concrete dams based on similarity of multi-point cloud[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 13-17. (in Chinese))
- [17] 燕建龙, 徐张建, 王朝阳, 等. 证据理论在滑坡危险性评价中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 519-523. (YAN Jianlong, XU Zhangjian, WANG Zhaoyang, et al. Research on assessment of landslide hazard by evidence theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 519-523. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-08-19 编辑: 胡新宇)