

综合评价法与功效系数法在滑坡监测预警评价中的应用

林立仁

湖南省遥感地质调查监测所, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年3月30日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月10日

摘要

本文采用气象因素、地质环境要素与监测指标综合统计法, 根据滑坡专业模型, 选取模糊综合评价、层次分析法与功效系数法等统计方法, 针对降雨诱发型滑坡进行空间预测。根据功效系数法对各个评价指标计算的单项功效系数值 g_i , 结合层次分析法对各个评价指标计算的权重系数 ω_i , 两者相乘得到各个评价对象的总功效系数值, 以总功效系数值作为预警等级划分评价标准, 根据数值大小划分滑坡预警等级。

关键词

模糊综合评价, 层次分析法, 功效系数法, 滑坡监测预警

Application of Comprehensive Evaluation Method and Efficacy Coefficient Method in Landslide Monitoring and Early Warning Evaluation

Liren Lin

Hunan Remote Sensing Geological Survey and Monitoring Institute, Changsha Hunan

Received: Mar. 30th, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 10th, 2022

Abstract

This paper adopts the comprehensive statistical method of meteorological factors, geological environment factors and monitoring indicators, according to the professional model of landslide,

statistical methods such as fuzzy comprehensive evaluation, analytic hierarchy process and efficacy coefficient method are selected, the spatial prediction of rainfall induced landslide is carried out. The single efficacy coefficient value g_i calculated for each evaluation index according to the efficacy coefficient method, combined with analytic hierarchy process, the weight coefficient of each evaluation index is calculated ω_i , the total efficacy coefficient of each evaluation object is obtained by multiplying the two, the total efficacy coefficient is used as the evaluation standard for early warning classification, the landslide warning level is divided according to the value.

Keywords

Fuzzy Comprehensive Evaluation, Analytic Hierarchy Process, Efficacy Coefficient Method, Landslide Monitoring and Early Warning

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 滑坡地质环境条件

1.1. 地形地貌

滑坡监测点位于湖南省株洲市石峰区铜塘湾街道办事处长石村, 滑坡所在区域属碎屑岩构造剥蚀丘陵地貌和浅变质岩构造剥蚀丘陵地貌。

1.2. 地层岩性

滑坡区出露的地层主要为: 第四系残坡积(Q^{el+dl})的粉质粘土及碎石土层、泥盆系中统跳马涧组(D_2t)全风化砂岩 - 中风化砂岩层、板溪群横路冲组(P_{tblz})全风化板岩 - 中风化板岩层。第四系粉质粘土呈硬塑状, 岩体基本质量等级为 V~IV 级[1]。

1.3. 地质构造

对该滑坡具有直接影响的地质构造主要是滑坡的前缘的十里冲逆断层, 该断层规模较大, 宽度为 10~35 m, 受断裂构造的影响, 滑坡区的岩体完整性遭到破坏, 同时由于断层的阻隔, 使得滑坡前缘成了地下水的排泄区, 使滑坡区尤其是滑坡中下部的地下水活动强烈, 地下水的活动加剧甚至是诱发滑坡的发生。地质构造特别是断裂构造对该滑坡的影响大。

1.4. 水文地质条件

1.4.1. 地下水类型及其赋水性

根据含水岩组的不同, 滑坡区内地下水类型主要有松散岩类孔隙水、碎屑岩基岩裂隙水和断层构造裂隙水三种类型。松散岩类孔隙水富水性贫乏; 碎屑岩基岩裂隙水富水性中等; 断层构造裂隙水富水性贫乏。

1.4.2. 地下水水位埋藏深度

勘查期间钻孔量测到地下水的稳定水位埋深为 0.82~17.40 m, 对应标高为 53.59~64.81 m。

1.4.3. 地下水对滑坡的影响

滑坡区的地下水较丰富, 水位埋藏较浅, 浅层和深层两个滑动面均在地下水水位之下, 因此滑带土

受到了地下水的渗透和浸泡，地下水的渗透和浸泡产生的渗透增荷效应、软化增荷效应增加了滑体的下滑力，减小了滑带的抗剪强度，加剧了滑坡的下滑。特别是在滑坡中下部地下水的渗透增荷效应、软化增荷效应更为强烈。

1.5. 人类工程活动

勘查区内人工活动较强烈，主要形式为湘黔铁路建设的路基取土在滑坡前缘形成了高约 5~8 m 的切方边坡，同时隧洞建设的爆破也对丘岗上的岩土体产生了一定的震动作用，斜坡坡脚的切方为本滑坡地质灾害的形成创造了滑动空间，增大了滑体势能，对滑坡的形成影响大，隧道建设的爆破震动对滑坡的形成也具有一定的影响。

2. 滑坡特征

2.1. 滑坡区地貌特征

滑坡区属构造剥蚀丘陵地貌，属于中型牵引式土质滑坡[1]。

2.2. 滑坡物质结构特征

滑坡体主要由残坡积(Q^{el+dl})含碎石粉质黏土、碎石土、砂土组成。局部夹有大块石，厚度为 8.50~29.90 m。浅层和深层滑带均由残坡积含碎石粉质黏土组成，黄褐色，硬可塑 - 可塑状，厚度为 0.30~0.80 m。滑床均由全风化岩组成，中上部为全风化砂页岩，下部为全风化断裂构造岩，岩石呈硬塑 - 坚硬土状，滑床下覆基岩为强风化岩。

2.3. 滑坡体变形特征

该滑坡目前处于蠕变阶段，滑坡要素尚不齐全，滑坡的变形特征主要表现为滑坡右后缘的拉张裂缝和滑坡前缘的剪张裂缝。勘查表明：滑坡区内共有 12 条裂缝，前缘陡坎上有少量崩塌土体，裂缝长约 1.0~27.0 m，宽约 0.2~12 cm，可见深度约 0.05~0.30 m，平面形态多呈似直线型，近滑坡右侧后缘呈雁列式排列，多属于鼓胀裂缝。

3. 滑坡监测平台

3.1. 滑坡监测内容

滑坡体监测的内容，一般分为变形监测、相关因素监测及宏观前兆监测三大类[2]。

- ① 滑坡体变形监测：一般包括位移监测和倾斜监测，以及与变形有关的物理量监测；
- ② 滑坡体形成和变形相关因素监测：气象监测、土体含水率及地下水位监测；
- ③ 滑坡体变形破坏宏观前兆监测：一般包含宏观地形变监测、地声监听、地表水和地下水宏观异常监测等。

3.2. 滑坡监测点布置

该滑坡共布置监测点位 14 个，设备 17 件套(其中 3 套为地下水深部测斜综合站)。其中：在 BZK2、BZK3 及 BZK4 号钻孔各安装一体化地下水深部测斜自动监测综合站 1 套；在滑坡上缘左边水沟旁、滑坡上缘中部及滑坡上缘右边水沟旁各安装滑坡伸缩仪 1 套；滑坡体中部中间水沟上方安装一体化雨量自动监测站 1 套；在雨量站左边 5 米左右安装一体化土壤含水率监测仪 1 套；在 BZK3 钻孔下方 2 米处、在 BZK4 钻孔右下位置、在滑坡体下方村口房前各安装一体化 GNSS 监测站 1 套；在滑坡体下方外缘道

路边安装一体化 GNSS 基准站 1 套，在滑坡体对面 100 米左右村民房屋楼顶安装一体化野外视频图像监测站 1 套，在滑坡体下方房子前道路右边安装 LED 显示屏 1 套[3]。监测点布置详见图 1，滑坡地质典型剖面见图 2。

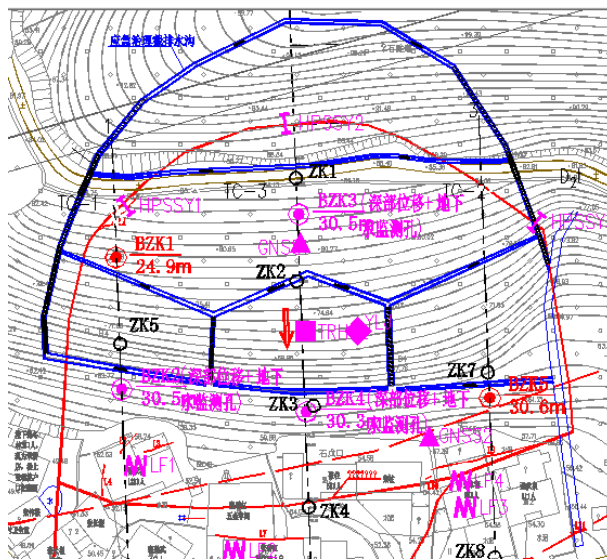


Figure 1. Layout plan of landslide monitoring points [4]
图 1. 滑坡监测点平面布置图[4]

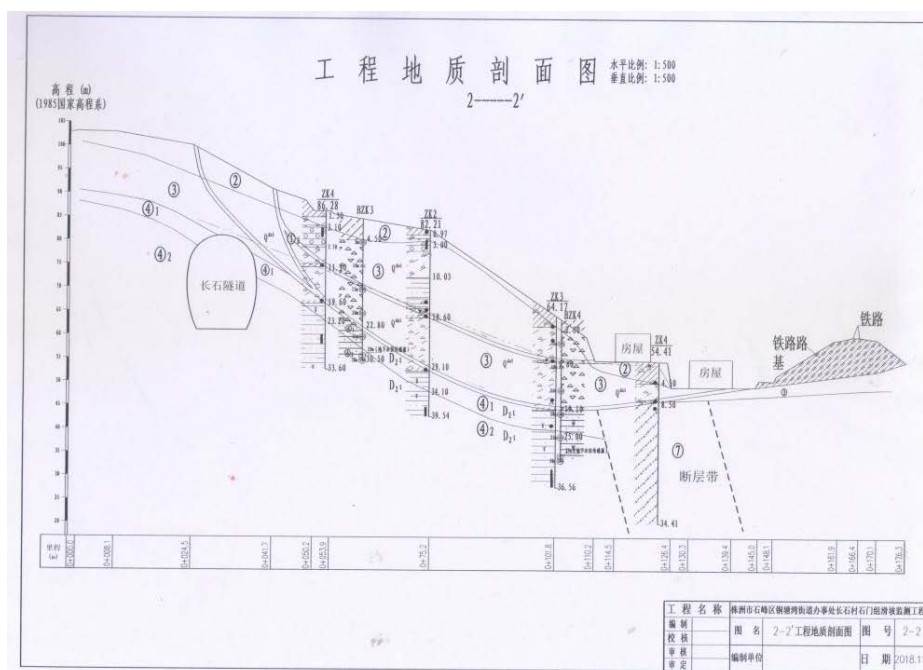


Figure 2. Geological profile of Shimen formation landslide [4]
图 2. 石门组滑坡地质剖面图[4]

4. 综合参数法预警模型建立方法

本文采用气象因素 - 地质环境要素 - 监测指标综合统计法，根据滑坡专业模型，选取综合参数法(模

糊综合评价、层次分析法、功效系数法)等统计方法,针对降雨诱发型滑坡进行空间预测。

4.1. 模糊综合评价法

4.1.1. 定义

1) 模糊综合评价

模糊综合评价法是一种基于模糊数学理论的综合评价方法,该方法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即利用模糊数学理论对受到多因素制约的事物或对象做出一个总体评价,适合各种非确定性问题的解决。滑坡稳定性判别是一种非确定性的问题,采用传统的定性分析方法,其评价结果完全受制于判断人的主观意志。为尽量消除人为因素带来的误差,本文将基于模糊综合判断理论,对滑坡的稳定性做出定量分析、半定量判断。

2) 隶属度函数

滑坡稳定性受到多种因素制约,如滑坡形态特征、滑坡岩土体特征、滑坡变形特征、强降雨及长时间降雨作用、人类工程活动、外部营力作用等。这些因素都是制约滑坡稳定性的重要条件,也就是说滑坡体稳定性的影响因素这一集合 U 中的每一个影响因素 $A(x)$ 为 U 函数。若将 U 看做单位 1,那么其隶属函数 $A(x_i) \in (0,1)$,也就是 $\sum_i^n A(x_i) = 1$,那么就可以用取值区间 $(0, 1)$ 隶属函数来描述滑坡影响因子的权重值,将隶属函数值归一化并赋特征值就可以用数值表达出滑坡稳定性等级。

4.1.2. 模糊综合评价的步骤

1) 确定评价对象的因素论域; 2) 确定评价等级论域; 3) 建立模糊关系矩阵 R ; 4) 确定评价因素的权向量; 5) 合成模糊综合评价结果向量; 6) 对模糊综合评价结果向量分析。

4.1.3. 确定评价对象因素论域

针对滑坡监测预警评价目标(A),根据调查选择该滑坡稳定性的影响因素(B):滑坡基础指数(B₁)、降雨诱发指数(B₂)、滑坡响应指数(B₃)等。滑坡监测预警评价指标体系详见表 1。

Table 1. Landslide monitoring and early warning evaluation index system

表 1. 滑坡监测预警评价指标体系

A 层	因素 B 层	因子 C 层
滑坡监测预警 评价(A)	滑坡基础指数(B ₁)	滑坡体岩土类别(C ₁)
		滑坡软弱结构面(C ₂)
		滑坡体抗剪强度指数(C ₃)
		滑坡体重度指数(C ₄)
	降雨诱发指数(B ₂)	小时降雨量诱发指数(C ₅)
		前 24 小时降雨量诱发指数(C ₆)
		前 72 小时累计降雨量诱发指数(C ₇)
		GNSS 变形量指数(C ₈)
	滑坡响应指数(B ₃)	地裂缝位移变形量指数(C ₉)
		深部测斜变形量指数(C ₁₀)
		土体含水率指数(C ₁₁)
		孔隙水渗压指数(C ₁₂)

该评价因子系统直接考虑了滑坡的稳定性特征、也包括该滑坡最重要的诱发因子为降雨情况，以滑坡监测系统指数为主要监测指标，从而提高预警的准确性。

4.1.4. 影响因子赋值体系

1) 影响因子赋值分级与量值

根据上文，影响该滑坡稳定性的影响因子(C)赋值分级与量值见表 2。

Table 2. Evaluation criteria of landslide stability evaluation indexes
表 2. 滑坡稳定性判别指标赋值标准表

影响因子	判别指标值			
	1	2	3	4
滑坡体岩土类别(C ₁)	软岩	硬塑 - 坚硬粘性土、极软岩	软塑 - 可塑粘性土	
软弱结构面(C ₂)	结构面稍发育	结构面发育	结构面很发育	
滑坡体抗剪强度(C ₃)	天然工况	长时间降雨工况	暴雨工况	
滑坡体重度(C ₄)	天然工况	长时间降雨工况	暴雨工况	
小时降雨量诱发指数(C ₅)	$C_5 \leq 1\text{mm}$	$1 < C_5 \leq 10$	$10 < C_5 \leq 20$	$C_5 > 20\text{ mm}$
前 24 小时降雨量诱发指数(C ₆)	$C_6 \leq 10\text{mm}$	$10 < C_6 \leq 25$	$25 < C_6 \leq 50$	$C_6 > 50\text{ mm}$
前 72 小时累计降雨量诱发指数(C ₇)	$C_7 \leq 25\text{mm}$	$25 < C_7 \leq 50$	$50 < C_7 \leq 100$	$C_7 > 100\text{ mm}$
GNSS 点变形量指数(C ₈)	$C_8 \leq 2\text{mm}$	$2 < C_8 \leq 10$	$10 < C_8 \leq 20$	$C_8 > 20\text{ mm}$
地裂缝位移变形量指数(C ₉)	$C_9 \leq 1\text{mm}$	$1 < C_9 \leq 10$	$10 < C_9 \leq 100$	$C_8 > 100\text{ mm}$
深部测斜变形量指数(C ₁₀)	$C_{10} \leq 10\text{mm}$	$10 < C_{10} \leq 30$	$30 < C_{10} \leq 100$	$C_{10} > 100\text{ mm}$
土体含水率指数(C ₁₁)	$C_{11} \leq 8\%$	$8 < C_{11} \leq 16$	$C_{11} > 16\%$	
孔隙水渗压指数(C ₁₂)	$C_{12} \leq 1.2\text{kPa}$	$1.2 < C_{12} < 3$	$C_{12} \geq 3\text{kPa}$	

2) 影响因子特征值基本情况

根据该滑坡体的基本特征及变形特征，综合考虑各稳定性影响因子权重及判别指标体系，滑坡稳定性影响因子特征值基本情况见表 3。

Table 3. Basic information of characteristic values of landslide stability influencing factors
表 3. 滑坡稳定性影响因子特征值基本情况

影响因子	基本情况	备注
滑坡岩土类别(C ₁)	全风化 - 强风化砂、页岩属极软岩	根据勘查报告
软弱结构面(C ₂)	土层与基岩覆盖面、发育一般	
滑坡体抗剪强度(C ₃)	一般情况 $24.0 \leq c \leq 41.3$; 一般情况 $15.5 \leq \varphi \leq 23.1$	随着含水量而变化
滑坡体重度(C ₄)	一般情况 $19.8 \leq C_4 \leq 20.4$	
小时降雨量诱发指数(C ₅)	一般情况 $C_5 \leq 10\text{ mm}$	
前 24 小时降雨量诱发指数(C ₆)	一般情况 $C_6 \leq 25\text{ mm}$	
前 72 小时累计降雨量诱发指数(C ₇)	一般情况 $25 < C_7 \leq 50\text{ mm}$	
GNSS 点变形量指数(C ₈)	一般情况 $5 < C_8 < 10\text{ mm}$	根据实时监测数据取值
地裂缝位移变形量指数(C ₉)	一般情况 $1 < C_9 < 10\text{ mm}$	
深部测斜变形量指数(C ₁₀)	一般情况 $15 < C_{10} < 40\text{ mm}$	
土体含水率指数(C ₁₁)	一般情况 $8 < C_{11} < 16\%$	
孔隙水渗压指数(C ₁₂)	一般情况 $1.2 < C_{11} < 3.0\text{ kpa}$	

3) 影响因子指标值的确定

根据计算权重原始数据的来源,可将权重确定方法分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。组合赋权法是一种综合主、客观赋权结果的复合赋权方法,它既能体现主、客观赋权法中专家的主观意向,又能反映指标的客观特性,可较好地避免单一赋权法的局限。其过程一般为:首先由专家群体对各评价指标的相对重要程度进行评判;然后采用相关的集结算法对单个专家的评判数据进行综合,得到各指标的权重。本项目将采用主、客观结合,综合评判的方法进行,详见表4。

Table 4. Comprehensive scoring table of landslide prediction and early warning evaluation index system
表 4. 滑坡预测预警评价指标体系综合评分表

A 层	影响因素 B 层	影响因子 C 层	综合评分值	
滑坡监测 预警评价 (A)	滑坡基础指数(B ₁)		2.53	
	降雨诱发指数(B ₂)		2.66	
	滑坡响应指数(B ₃)		2.89	
	基础指数(B ₁)	滑坡体岩土类别(C ₁)		2.11
		软弱结构面(C ₂)		2.33
		滑坡体抗剪强度(C ₃)		2.21
		滑坡体重度(C ₄)		2.29
	诱发指数(B ₂)	小时降雨量诱发指数(C ₅)		1.20
		前 24 小时降雨量诱发指数(C ₆)		1.41
		前 72 小时累计降雨量诱发指数(C ₇)		1.94
	响应指数(B ₃)	GNSS 点变形量指数(C ₈)		2.46
		地裂缝位移变形量指数(C ₉)		2.51
深部测斜变形量指数(C ₁₀)			2.49	
土体含水率指数(C ₁₁)			2.01	
孔隙水渗压指数(C ₁₂)			2.04	

4.2. 层次分析法(AHP)

4.2.1. 定义

层次分析法是系统分析方法,该方法适用于结构较为复杂、决策准则较多而且不易量化的决策问题。它把复杂问题中的各因素划分为互相联系的有序层并使之条理化,根据对客观实际的模糊判断,就每一层次的相对重要性给出定量的表示,再利用模糊数学方法确定全部元素相对重要性次序的权系数。

4.2.2. 层次分析法步骤

1) 确定目标和评价因素; 2) 构造判断矩阵; 3) 计算判断矩阵; 4) 一致性检验。

4.2.3. 滑坡稳定性层次分析

1) 确定问题、提出总目标。本次分析的目标为滑坡稳定性等级。

2) 建立层级结构。将滑坡稳定性等级划分分级为三个层次。第一层位总目标(目标层),即为本次分析的目的;第二层为分层目标(准则层),准则层各个因素性质决定目标层;第三层为子准则层,子准则层为上一级准则层某因素的影响因子。

3) 分析因子影响权重的确定

① 因子比较标度

因子影响权重即为模糊评价中各个论域元素对评价结果的影响程度。因子比较标度即为各个因子对评价对象影响程度的相互比较，判断矩阵元素的标度方法见表 5。

Table 5. Scale table

表 5. 比例标度表

因素 i 比因素 j	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8

② 确定因素比较结果

滑坡稳定性影响因素间的相互比较结果受主观影响程度较高，为了尽量减小主观判断的片面性，根据上文表 4：滑坡预测预警评价指标体系综合评分表的各因素因子的综合评分值，结合各个影响因子对滑坡稳定性影响的影响效果，并最终确定因子比较标度。最终得到滑坡稳定性影响因子的比较判断结果统计表见表 6，各因子权重计算见表 7~10。

Table 6. Matrix construction and weight calculation of landslide influencing factors (layer B)

表 6. 滑坡影响因素(B 层)矩阵构建与权重计算

滑坡预测	基础因子(B1)	诱导因子(B2)	响应因子(B3)	Wi
基础因子(B1)	1.00	0.95	0.88	0.3133
降雨诱导因子(B2)	1.05	1.00	0.92	0.3292
响应因子(B3)	1.14	1.09	1.00	0.3575

滑坡预测 判断矩形一致性比例为：0；对总目标的权重：1。

Table 7. Foundation factor matrix construction and weight calculation of criterion layer

表 7. 准则层基础因子矩阵构建与权重计算

基础指数(B1)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	Wi
滑坡体岩土类别(C1)	1.00	0.91	0.95	0.93	0.2364
软弱结构面(C2)	1.10	1.00	1.05	1.02	0.2604
滑坡体抗剪强度(C3)	1.05	0.95	1.00	0.97	0.2476
滑坡体重度(C4)	1.08	0.98	1.03	1.00	0.2557

基础因子(B1) 判断矩形一致性比例为：0.000173；对总目标的权重：0.2965。

Table 8. Construction and weight calculation of response factor matrix of criterion layer

表 8. 准则层响应因子矩阵构建与权重计算

降雨诱发指数(B2)	(C5)	(C6)	(C7)	Wi
小时降雨量诱发指数(C5)	1.00	0.85	0.62	0.2634
前 24 小时降雨量诱发指数(C6)	1.18	1.00	0.73	0.3103
前 72 小时累计降雨量诱发指数(C7)	1.62	1.37	1.00	0.4263

诱发因子(B2) 判断矩形一致性比例为：0.000256；对总目标的权重：0.3292。

Table 9. Construction and weight calculation of guidance factor matrix of criterion layer
表 9. 准则层诱导因子矩阵构建与权重计算

响应因子(B3)	(C ₈)	(C ₉)	(C ₁₀)	(C ₁₁)	(C ₁₂)	Wi
GNSS 变形量指数(C ₈)	1.00	0.98	0.99	1.22	1.20	0.2134
地裂缝位移变形量指数(C ₉)	1.02	1.00	1.01	1.25	1.23	0.2184
深部测斜变形量指数(C ₁₀)	1.01	0.99	1.00	1.23	1.22	0.2159
土体含水率指数(C ₁₁)	0.82	0.80	0.81	1.00	0.99	0.1749
孔隙水渗压指数(C ₁₂)	0.83	0.81	0.82	1.01	1.00	0.1774

响应因子(B3) 判断矩形一致性比例为: 0.000057; 对总目标的权重: 0.3575。

Table 10. Combination weight of landslide impact factors
表 10. 滑坡影响因子指标组合权重

项目	基础因子 B1	诱导因子 B2	响应因子 B3	组合权重 ($\sum CiBi$)
B 层	0.3133	0.3292	0.3575	
滑坡体岩土类别(C ₁)	0.2364			0.0741
滑坡软弱结构面(C ₂)	0.2604			0.0816
滑坡体抗剪强度指数(C ₃)	0.2476			0.0776
滑坡体重度指数(C ₄)	0.2557			0.0633
小时降雨量诱发指数(C ₅)		0.2634		0.0867
前 24 小时降雨量诱发指数(C ₆)		0.3103		0.1022
前 72 小时累计降雨量诱发指数(C ₇)		0.4263		0.1403
GNSS 变形量指数(C ₈)			0.2134	0.0763
地裂缝位移变形量指数(C ₉)			0.2184	0.0781
深部测斜变形量指数(C ₁₀)			0.2159	0.0772
土体含水率指数(C ₁₁)			0.1749	0.0625
孔隙水渗压指数(C ₁₂)			0.1774	0.0634

注: C_i 是指指标层的单项因子权重, B_i 是指准则层指标的权重。

4.3. 基于功效系数的滑坡预警指标单项功效系数的确定

功效系数法又叫功效函数法, 是一种反映多个指标、综合分析的定量评价方法, 对每一项评价指标确定一个满意值和不允许值, 以满意值为上限, 以不允许值为下限, 计算各指标实现满意值程度, 并以此确定各指标的功效系数值, 再经过加权评价确定综合评价值, 从而评价被研究对象的综合状况。

4.3.1. 分析步骤

其评价步骤如下:

① 选取评价指标: 评价指标须具有代表性和典型性, 在评价体系中既要独立又能互补, 应尽可能地反映评价目标的总体情况。

② 确定评价指标的满意值和不允许值: 满意值是人们根据自身或行业经验给出的一个值; 不允许值一般取评价指标的可以接受的最低值或最高值。

③ 评价指标的单项功效系数函数: 共分为 4 种变量, 其中指标值越大、单项功效系数值越高的为极

大型变量；指标数值越小、单项功效系数要高的为极小型变量；指标数值在某一点时其单项系数最高的为稳定型变量；指标数值在某一区间时其单项系数最高的为区间型变量。

④ 滑坡影响因子指标的能效系数计算：依据选取的滑坡影响因子指标的特征及其在滑坡形成、发展过程中作用与能效的大小，考虑不同影响因子指标的变化区间，进行分别计算与赋值。

4.3.2. 极大型影响因子单项能效系数的计算

项目选取的滑坡影响因子属于极大型变量的有滑坡体重度、小时降雨量诱发指数、前 24 小时降雨量诱发指数、前 72 小时累计降雨量诱发指数、GNSS 点变形量指数、地裂缝位移变形量指数、深部测斜变形量指数、土体含水率指数、孔隙水渗压指数等影响因子。

根据前人研究结果和指标的特性，在本项目中极大型变量单项能效系数计算中的满意值为最大值，不允许值为最小值，具体见表 11。

Table 11. Determination of parameters in single efficacy coefficient function of landslide index

表 11. 滑坡指标单项能效系数函数中参数确定

指标项	满意值(X_{yi})	不允许值(X_{mi})	备注
滑坡体重度	20.4	19.8	
小时降雨量诱发指数	10	1	
前 24 小时降雨量诱发指数	50	10	
前 72 小时累计降雨量诱发指数	100	25	结合本工程监测数据、滑坡勘察报告及地区经验值综合确定
GNSS 点变形量指数	30	2	
地裂缝位移变形量指数	200	1	
深部测斜变形量指数	150	10	
土体含水率指数	18	8	
孔隙水渗压指数	5	1	

4.3.3. 极小型影响因子单项能效系数的计算

项目选取的滑坡影响因子属于极小型变量的有滑坡体抗剪强度。考虑到钟表的特征，指标的满意值(X_{yi})为 20，不允许值(X_{mi})为 40。

4.3.4. 概念型影响因子能效系数的确定

项目选取的滑坡影响因子属于概念型变量的有滑坡体岩土类别及软弱结构面。

① 滑坡体岩土类别

根据岩石坚硬程度(饱和单轴抗压强度)将滑坡体岩性判别标准分为五个等级。60 < C_1 ；30 < $C_1 \leq 60$ ；15 < $C_1 \leq 30$ ；5 < $C_1 \leq 15$ ； $C_1 \leq 5$ 。分别对应 A 类为极软岩；B 类为软岩；C 类为较软岩；D 类为较硬岩；E 类为坚硬岩，具体见表 12。

Table 12. Efficacy coefficient of lithologic factors of landslide mass

表 12. 滑坡体岩性因子的能效系数

饱和单轴 抗压强度	A	B	C	D	E
能效系数	100	60	30	15	5

② 软弱结构面

根据软弱结构面发育程度将软弱结构面指数分为四个等级。结构面不发育；结构面稍发育；结构面发育；结构面很发育，具体见表 13。

Table 13. Efficacy coefficient of weak structural plane factor

表 13. 软弱结构面因子的功效系数

软弱结构面发育程度	很发育	发育	稍发育	不发育
功效系数	100.0	82.4	64.3	37.9

4.3.5. 总功效系数值

根据功效系数法对各个评价指标计算的单项功效系数值 g_i ，结合前文层次分析法对各个评价指标计算的权重系数 ω_i ，两者相乘得到各个评价对象的总功效系数值：

$$G = \sum_i^m g_i \times \omega_i$$

其中： G 为评价对象的总功效系数值； g_i 为第 i 个评价指标的单项功效系数值； ω_i 为第 i 个评价指标的权重系数(根据层次分析法计算得到)。

5. 预警等级的划分

根据总功效系数值公式计算可得总功效系数，总功效系数大小与预警等级划分是根据功效系数法原理，参照相关研究成果，以总功效系数值作为评价标准，根据数值大小划分滑坡预警等级，详见表 14。

Table 14. Landslide warning grade

表 14. 滑坡预警等别

预警等级	总功效系数 G 值	说明	预警级别
I	≤60	可能性很小，不发布预警信息	不预警
II	60~70	可能性较小，不发布预警信息	注意级
III	70~80	可能性较大，发布黄色预警信息	警示级
IV	80~90	可能性大，发布橙色预警信息	警戒级
V	>90	可能性很大，发布红色预警信息	警报级

注：各项指标在不同的区域可能有所差异，目前所确定的指标值与相关参数的界定是通用的，在不同的区域要根据实际情况进行稍微的调整与变动。

6. 本文结论

1) 本项目采用气象因素 - 地质环境要素 - 监测指标综合统计法，根据滑坡专业模型，选取综合参数法(模糊综合评价、层次分析法、功效系数法)等统计方法，针对降雨诱发型滑坡进行空间预测，对滑坡的稳定性做出定量分析、半定量判断。

2) 本项目通过将滑坡稳定性等级划分为三个层次，分别为目标层(A)、准则层(B)及子准则层(C)，结合模糊数学方法确定各影响因子的相对重要性，采用层次分析法计算各影响因素及影响因子的权重。

3) 本项目建立基于地质环境条件与气象因素相耦合的功效系数法滑坡预测预警模型。根据多目标规划的原理，把所要考核的各项指标按照多档次标准，通过功效函数转化为可以度量的评价分数。根据评

价指标的单项功效系数(g_i), 再结合评价指标的权重系数(ω_i), 计算评价各滑坡点的总功效系数值(G), 再以总功效系数值作为评价标准, 根据数值大小划分滑坡预警等级。

参考文献

- [1] 国家标准化管理委员会. 国家标准《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016) [S]. 北京: 国家标准化管理委员会出版社, 2016.
- [2] 国家标准化管理委员会. 国家标准《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020) [S]. 北京: 国家标准化管理委员会出版社, 2020.
- [3] 中国地质灾害防治工程行业协会. 中国地质灾害防治协会标准《地质灾害分类分级标准》(T/CAGHP 018-2016) [S]. 北京: 中国地质灾害防治工程行业协会出版社, 2018.
- [4] 王卫平, 颜平均, 林立仁, 等. 株洲市石峰区长石村石门组监测数据分析及滑坡预警模块建设报告[R]. 长沙: 长沙市玖车测控技术有限公司, 2019.