

# 沅麻盆地降雨诱发滑坡阈值模型研究<sup>①</sup>

龙长聪<sup>1</sup>, 李军伟<sup>2</sup>, 蒋鑫<sup>3</sup>, 王津<sup>4</sup>, 段艳平<sup>1</sup>

(1.湖南省自然资源调查所, 湖南长沙 410014; 2.湖南省地质实验测试中心, 湖南长沙 410007; 3.湖南省地质地理信息所, 湖南长沙 410014; 4.湖南科技大学, 湖南湘潭 411201)

**摘要:**以湖南省沅麻盆地红层区麻阳、沅陵、泸溪三县降雨型滑坡为研究对象,进行滑坡与降雨的相关性分析;在 $E-D$ 阈值模型基础上,引入当日降雨量 $R$ 作为第三指标构建 $E-D-R$ 阈值模型,确定沅麻盆地降雨阈值;基于泰森多边形划分方法,对研究区域进行预警单元划分,实现县域级别的单元分级预警响应。结果表明:滑坡前4 d至滑坡当日为沅麻盆地诱发滑坡的关键降雨时期,降雨有效系数 $\alpha$ 取0.5较为合适;相较于 $E-D$ 二维阈值模型, $E-D-R$ 三维阈值模型精度更高,在滑坡风险评估中具有更高的准确性和可靠性;网格化、精细化预警单元划分不仅能增强滑坡灾害气象预警的精细化管控能力,而且能在未来预警预报中,结合预报雨量和降雨信息,实现单元差异化预警。

**关键词:**沅麻盆地; 滑坡; 降雨量; 阈值模型; 预警预报; 地质灾害

中图分类号: P642; TU446

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.004

文章编号: 0253-6099(2025)03-0022-07

## Threshold Model for Rainfall-Induced Landslides in Yuanma Basin

LONG Changcong<sup>1</sup>, LI Junwei<sup>2</sup>, JIANG Xin<sup>3</sup>, WANG Jin<sup>4</sup>, DUAN Yanping<sup>1</sup>

(1. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410014, Hunan, China; 2. Geological Experiment and Testing Center of Hunan Province, Changsha 410007, Hunan, China; 3. Geological and Geographic Information Institute of Hunan Province, Changsha 410014, Hunan, China; 4. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

**Abstract:** As for rainfall-induced landslides in Mayang, Yuanling and Luxi counties within the red-bed region of the Yuanma Basin in Hunan Province, a correlation between landslides and rainfall were analyzed. Based on the  $E-D$  threshold model, the daily rainfall ( $R$ ) was introduced as a third indicator to construct an  $E-D-R$  threshold model, thereby rainfall thresholds were determined for the Yuanma Basin. The study area was divided into warning units with the Thiessen Polygon method, enabling a county-level, unit-based graded warning response. The results show that the period from four days before a landslide to the day of the landslide represents the critical rainfall period for inducing landslides in the Yuanma Basin, and it is deemed appropriate for the effectiveness coefficient ( $\alpha$ ) of the rainfall to be 0.5. Compared to the two-dimensional  $E-D$  threshold model, the three-dimensional  $E-D-R$  threshold model demonstrates higher precision and offers greater accuracy and reliability in landslide risk assessment. The grid-based and refined division of warning units not only enhances the refined management and control capabilities of meteorological warnings for landslide disasters, but also facilitates unit-specific differentiated warnings in future forecasting by integrating predicted rainfall and rain information.

**Key words:** Yuanma Basin; landslide; rainfall; threshold model; warning and forecasting; geological disaster

滑坡诱因复杂,主要归为人为因素与自然因素。人为因素涉及不合理切坡、开挖及坡顶堆载等;自然因素涵盖降雨、不良地质条件、地震及融雪等。据统计,

近年80%以上的滑坡灾害发生在雨量充沛的5~9月,90%以上的滑坡灾害由降雨诱发<sup>[1]</sup>。通过分析区域降雨特征来开展滑坡灾害预警,关键是确定诱发滑坡的

① 收稿日期: 2024-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(52279100); 湖南省自然资源厅基金项目(20230143DZ)

作者简介: 龙长聪(1984—),男,湖南隆回人,硕士,高级工程师,主要从事水工环地质与岩土工程方面的研究工作。E-mail: 279576356@qq.com

通信作者: 李军伟(1980—),男,河南原阳人,硕士,研究员级高级工程师,主要从事工程地质与岩土工程方面的研究工作。E-mail: 285789051@qq.com

降雨临界值,即降雨阈值。根据降雨阈值进行滑坡灾害预警是常用的地质灾害防控手段<sup>[2]</sup>。

国内外学者围绕降雨阈值的确定进行了大量研究,主要研究思路有两类:一类是基于极限平衡原理,结合模型试验及数值方法确定降雨阈值;另一类是统计分析区域历年滑坡和降雨数据得到经验性降雨阈值<sup>[3]</sup>。前者为确定性分析方法,通常需要获取岩土体力学参数,受试验条件限制,同时降雨过程中岩土体力学参数变化复杂,实际上很难获取准确的岩土体力学参数,导致准确量化分析降雨诱发滑坡过程极其困难<sup>[4]</sup>。因此,区域降雨滑坡灾害预警更多采用后者。

对经验性降雨阈值的研究始于1975年,文献<sup>[5]</sup>在探讨加利福尼亚中南部地区的降雨与滑坡之间的相互关联时,提出滑坡的发生与降雨量存在某种关联,首次引入了滑坡临界累计降雨量的概念。文献<sup>[6]</sup>在文献<sup>[5]</sup>的基础上收集整理全球范围内未受人工侵扰或除降雨外其他因素造成的滑坡事件,于1980年首次用降雨强度与降雨持续时间关系表达式构建了全球滑坡降雨强度-持续时间( $I-D$ )阈值模型。目前,除了 $I-D$ 阈值模型外,经验性降雨阈值模型还包括有效累计降雨量-持续时间( $E-D$ )模型、有效累计降雨量-降雨强度( $E-I$ )模型、降雨诱发滑坡的有效总降雨量阈值模型以及引入当日降雨量 $R$ 建立的 $I-D-R$ 阈值。  $I-D$  阈值模型是当前研究降雨阈值应用极为广泛的方法,国内外众多学者采用这一阈值模型来分析区域滑坡临界降雨阈值<sup>[7-8]</sup>。但 $I-D$ 阈值模型在一定程度上描述的是降雨过程中降雨强度均值与持续时间的关系,实际工程中,滑坡的发生不仅与降雨强度有关系,而且与滑坡的当日降雨量 $R$ 以及前期降雨特征关系密切相关<sup>[9]</sup>。

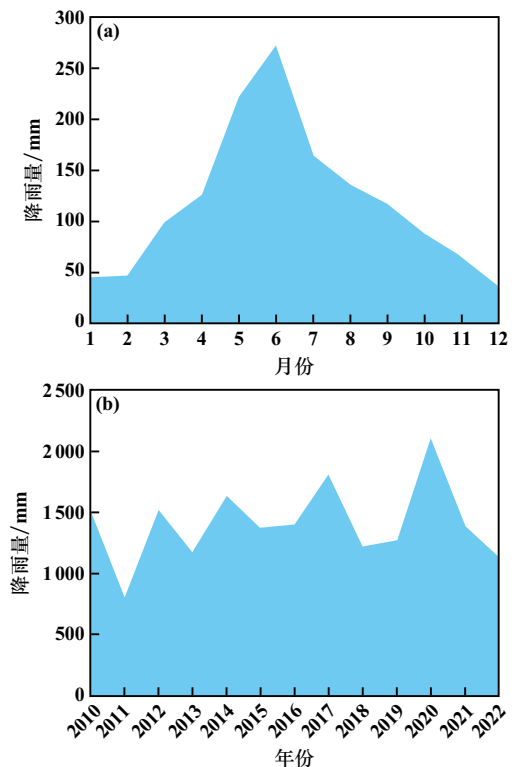
本文以湖南省沅麻盆地红层区的麻阳、沅陵、泸溪3个县为研究区域,收集并整理研究区域内滑坡及降雨资料,进行滑坡事件与降雨的相关性分析;在 $E-D$ 阈值模型基础上,引入当日降雨量 $R$ ,建立 $E-D-R$ 阈值模型,确定沅麻盆地降雨阈值;并基于泰森多边形划分方法,对研究区域进行预警单元划分,实现县级级别下的单元分级预警响应,为沅麻盆地及相邻地区降雨型滑坡的预测预报提供科学依据和参考。

## 1 沅麻盆地概况

沅麻盆地是沅陵—麻阳—芷江早、晚期新华夏系拗陷地带的主体组成部分,出露于早期华夏武陵山、雪峰山褶皱带之间的过渡区。东以 $T_3-J_1$ 或 $K_1$ 与下伏地层不整合为界,西以 $K_1$ 与下伏地层不整合为界。总体走向 $20^\circ\sim 35^\circ$ ,长255 km,宽30~65 km,面积10 500 km<sup>2</sup>。

沅麻盆地以侵蚀剥蚀中低山、丘陵地貌为主,地形独特,三面高、中部低,坡体切割强烈,沟谷发育,山脉走向与构造线方向一致<sup>[10-11]</sup>。沅麻盆地内地层主要形成于中生代、新生代,出露地层主要有第四系、白垩系、侏罗系、上三叠系等,以陆相沉积为主的碎屑沉积岩层为主,外观以红色为主,故称其为“红层”。盆地内红层可分为黏土岩类、砂质岩类、砾岩类3个岩类<sup>[12]</sup>。黏土岩类以薄层至中厚层状为主,多分布于红层内软弱夹层,风化后易泥化,其密实结构和低空隙率导致水平或缓波状层理,浸水后易崩解软化,形成滑带(面)。砂质岩类多呈紫红色或紫色,具有缓波状层理,局部交错或斜层理,由泥质、铁质和硅质胶结,部分含钙质及碳酸盐等晶体,胶结物受水作用易泥化或溶蚀,形成含水或透水带,但溶蚀程度轻。砾岩类主要为底砾岩,砾石多源于下伏灰岩,厚层至巨厚层状,风化后形成丹霞地貌。

沅麻盆地属亚热带气候区,降雨充沛且雨季较长<sup>[13]</sup>。根据湖南省气象局数据,2010—2022年沅麻盆地降雨量情况如图1所示。沅麻盆地全年降雨呈现单峰分布,具有明显季节性,4月至7月上旬为一年之中的雨季,这个时期的降雨量约占年降雨量的38%,其中6月降雨量最多,占年降雨量的15%;平均年降雨量可达1 414.5 mm,其中2020年总降雨量超过了2 100 mm;



(a) 月平均降雨量; (b) 年降雨量

图1 2010—2022年沅麻盆地降雨量情况

Fig. 1 Rainfall in Yuanma Basin from 2010 to 2022

平均年降雨天数 267 d,其中 2017 年降雨天数近 300 d;该地区雨水充沛,年降雨量呈现波动性增长,年降雨量主要受暴雨次数、梅雨时长影响。

根据调查,2000—2022 年期间发育于沅麻盆地麻阳、泸溪、沅陵区域内的滑坡共 661 起,历年滑坡数量如图 2(a) 所示。23 年间滑坡数量呈锯齿形分布,其中 2004 年滑坡灾害的频发程度尤为突出。2000—2022 年间由滑坡造成的经济损失情况如图 2(b) 所示。可见不同年份经济损失金额存在显著差异,其中 2014 年滑坡灾害造成的经济损失最大。

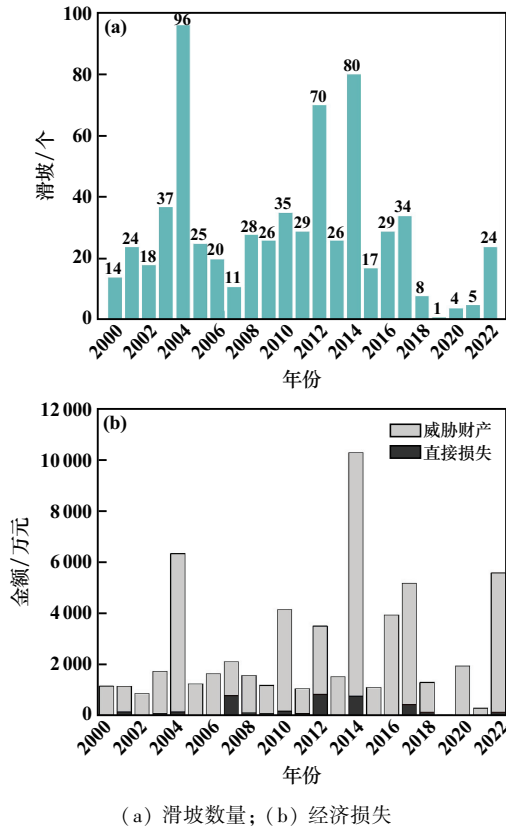


图 2 2000—2022 年沅麻盆地滑坡数量及滑坡造成的经济损失  
Fig. 2 Statistics of landslides and their economic cost in Yuanma Basin from 2000 to 2022

## 2 沅麻盆地滑坡与降雨相关性分析

### 2.1 滑坡与降雨的相关性

图 3 为 2010—2022 年沅麻盆地滑坡灾害频次与全年月平均降雨量分布情况。从图 3 可知,滑坡灾害频次与月平均降雨量均符合正态分布,滑坡多发于 4—7 月的雨季,于 6 月达到峰值,秋、冬季雨水匮乏,滑坡减少。

从 2000—2022 年沅麻盆地研究区域内滑坡信息及滑坡前 15 d 的降雨详细数据中,剔除无明确滑动时

间和降雨资料缺失的滑坡点,综合考虑降雨情况及滑坡明确诱发因素,最终确定 2000—2022 年沅麻盆地研究区域内与降雨有关的滑坡共 227 个。统计滑坡前 15 d 最大日降雨量与滑坡数,结果见表 1。从表 1 可以看出,滑坡前 15 d 最大日降雨量为暴雨及以上等级的滑坡占比为 50.66%。

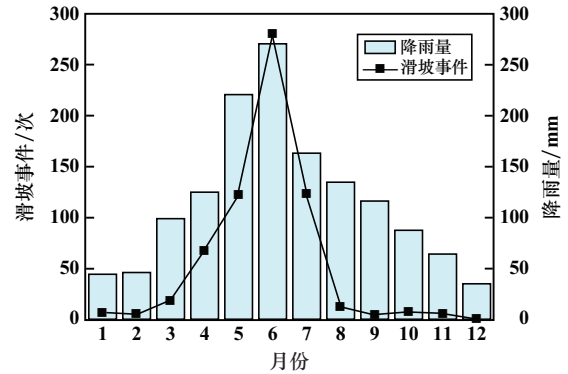


图 3 2010—2022 年沅麻盆地滑坡灾害频次与全年月平均降雨量分布情况  
Fig. 3 Monthly average rainfall and frequency of landslide disasters in Yuanma Basin from 2010 to 2022

表 1 滑坡前 15 d 最大日降雨量及滑坡数统计

Table 1 Statistical analysis of the maximum daily rainfall within 15 days before landslide and landslide occurrence

最大日降雨量/mm	降雨等级	滑坡数/个	滑坡比例/%
[0,10)	小雨	10	4.41
[10,25)	中雨	29	12.77
[25,50)	大雨	73	32.16
[50,100)	暴雨	50	22.03
[100,250)	大暴雨	64	28.19
[250,+∞)	特大暴雨	1	0.44

分析研究区域内降雨型滑坡前 15 d 降雨数据发现,滑坡一般滞后于降雨事件(尤其是暴雨及以上级别的降雨),且短时间强降雨常常导致研究区域内多地同时发生滑坡,即发生群发性滑坡。长时间连续降雨也易诱发滑坡。滑坡易发程度与降雨强度、降雨量、降雨时长等呈显著正相关。

### 2.2 滑坡与前期累计降雨量的相关性

湖南省气象地方站 2010 年开始陆续投入使用,2013 年后站点系统趋于稳定,因此选取 2013—2022 年沅麻盆地研究区域内的滑坡进行分析。将同一天同一站点附近的多次滑坡计为 1 起滑坡,统计得到滑坡 111 起,从滑坡附近按照相同规则遴选未滑坡 52 起,分别匹配降雨事件,共计得到 163 例样本。以  $D_0$  表示滑坡当日降雨量, $D_1$  为滑坡 1 d 前日降雨量, $D_2$  为滑坡 2 d

前日降雨量,以此类推,得:

$$P_n = \sum_{i=1}^n D_n \quad (1)$$

式中: $D_n$  为滑坡  $n$  天前日降雨量,mm; $P_n$  为滑坡  $n$  天前累计降雨量,mm。

以滑坡对应的滑坡次数作为滑坡因子,分析滑坡与前期累计降雨量的相关性,得到简单相关系数  $r^{[14]}$ , 计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

对简单相关系数  $r$  进行统计检验,其统计量  $t$  为:

$$t = \frac{r\sqrt{m-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

式中: $x_i$  和  $y_i$  分别为某起滑坡对应的滑坡次数和滑坡前累计降雨量; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  为相应变量的平均值; $m$  为滑坡次数。 $r \geq 0.8$  时,滑坡与前期累计降雨量高度相关; $0.5 \leq r < 0.8$  时,滑坡与前期累计降雨量中等相关; $0.3 \leq r < 0.5$  时,滑坡与前期累计降雨量较低相关度; $r < 0.3$  时,滑坡与前期累计降雨量不相关。

使用 SPSS 软件对沅麻盆地研究区域内滑坡与滑坡前累计降雨量进行相关性分析,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,相关系数  $r$  整体呈先升后降趋势,滑坡前 1 d 累计降雨量( $P_1$ ) 达到峰值,滑坡前超过 4 d 的累计降雨量下降趋势显著增大,滑坡前超过 8 d 的累计降雨量逐渐减缓并趋于平缓。 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  相关系数均达到了 0.590 及以上,且均在 0.01 级别下呈显著性相关<sup>[4,13]</sup>。综上所述,认为滑坡当日及前 4 d 为沅麻盆地滑坡预警的降雨关键期,可将这 5 d 看作有效降雨时间段。

表 2 滑坡与前期累计降雨量相关性分析结果

Table 2 Correlation between landslides and accumulated rainfall in the early period

累计降雨量	相关系数 $r$	累计降雨量	相关系数 $r$
$P_0$	0.597 **	$P_8$	0.513 **
$P_1$	0.632 **	$P_9$	0.510 *
$P_2$	0.609 **	$P_{10}$	0.507 **
$P_3$	0.590 **	$P_{11}$	0.490 **
$P_4$	0.591 **	$P_{12}$	0.495 **
$P_5$	0.557 **	$P_{13}$	0.484 **
$P_6$	0.526 **	$P_{14}$	0.483 **
$P_7$	0.529 **	$P_{15}$	0.490 **

注:\*\*表示在 0.01 级别(双尾)显著性相关;\*表示在 0.05 级别(双尾)显著性相关。

### 2.3 滑坡与前期降雨有效系数的相关性

降雨对滑坡的影响随着时长增加逐渐降低,因此前期累计降雨量不应该是简单相加,而是有一定的衰减。Crozier 提出了前期有效累计降雨量公式为<sup>[15]</sup>:

$$E = D_0 + \alpha D_1 + \alpha^2 D_2 + \dots + \alpha^n D_n \quad (4)$$

式中: $E$  为有效累计降雨量,mm; $\alpha$  为降雨有效系数,取值范围为[0.4,1.0]<sup>[16]</sup>。

考虑到不同地区气象、地质环境差异性,应确定研究区域适宜的降雨有效系数  $\alpha$ 。由表 2 可知, $n=1$  时相关性最大,故选取滑坡前 1 d 为最关键降雨天数<sup>[4,13]</sup>,即令式(4)中  $n=1$ ,在[0.4,1.0]等距选取不同系数 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 分别计算有效累计降雨量,再与滑坡次数进行双变量相关性分析,结果如表 3 所示。

表 3 不同  $\alpha$  值下滑坡与有效累计降雨量相关性分析

Table 3 Correlation between landslides and effectively accumulated rainfall under different  $\alpha$  values

$\alpha$	相关系数 $r$	$\alpha$	相关系数 $r$
0.4	0.641 **	0.8	0.639 **
0.5	0.643 **	0.9	0.636 **
0.6	0.643 **	1.0	0.632 **
0.7	0.641 **		

注:\*\*表示在 0.01 级别(双尾)显著性相关。

由表 3 可知,滑坡与前期有效累计降雨量相关系数  $r$  随着降雨有效系数  $\alpha$  增加先升后降, $\alpha=0.5$  和  $\alpha=0.6$  时相关系数达到 0.643。因此,沅麻盆地研究区域内降雨有效系数  $\alpha$  取 0.5 较为合适。

考虑到滑坡前 4 d 至滑坡当日为沅麻盆地滑坡预警的降雨关键期,这里取  $n < 5$ 。

## 3 沅麻盆地降雨阈值与预警分级

### 3.1 E-D 阈值模型与预警分级

将 2013—2022 年沅麻盆地研究区域内 227 起滑坡发生前 0~15 d 内的有效累计降雨量  $E$  与降雨持续时间  $D$  绘制到  $E-D$  双对数坐标中,通过非线性幂函数拟合得到  $E-D$  阈值曲线,如图 4 所示。

根据《暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级》(QX/T 487—2019)<sup>[17]</sup>中关于有效雨量致灾概率  $P_e$  的划分标准,将滑坡预警等级分为 5 个:不注意( $P_e < 20\%$ )、注意( $20\% \leq P_e < 40\%$ )、特别注意( $40\% \leq P_e < 60\%$ )、警告( $60\% \leq P_e < 80\%$ )、严重警告( $P_e \geq 80\%$ )。按滑坡致灾概率反演降雨阈值,得到沅麻盆地滑坡概

率 20%、40%、60%、80% 的阈值曲线如图 5 所示。

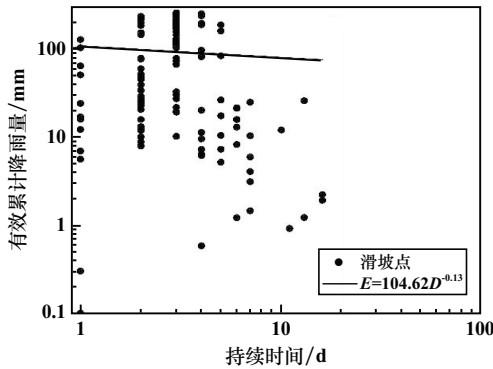


图 4 沅麻盆地滑坡 E-D 阈值曲线

Fig.4 E-D threshold curve of landslides in Yuanma Basin

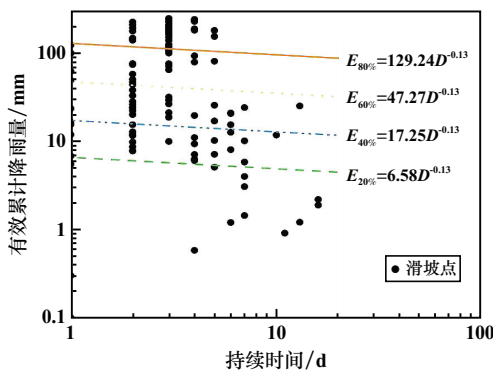


图 5 不同滑坡概率的 E-D 阈值曲线

Fig.5 E-D threshold curves for landslides with different hazard probabilities

### 3.2 E-D-R 三维阈值模型与预警分级

在 E-D 阈值模型的基础上,引入第三维度指标 R,以更立体地分析降雨与滑坡之间的关系。各个等级的临界降雨指标  $E_i$ 、 $R_i$  满足:

$$\begin{cases} E_{i-1} \leq E < E_i \\ R < R_{i-1} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} E < E_{i-1} \\ R_{i-1} \leq R < R_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $E$  为有效累计降雨量, mm;  $R$  为当日降雨量, mm;  $i$  为滑坡灾害阈值等级,且满足  $R_0$ 、 $E_0 \rightarrow 0$ ,  $E_{i(\max)}$ 、 $E_{i(\max)} \rightarrow \infty$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

根据各级 E-D 阈值曲线方程及 R 的划分共同构建 E-D-R 三维阈值模型。2013—2022 年沅麻盆地研究区域内 227 起滑坡的 E-D-R 三维散点分布及投影见图 6, E-D-R 三维阈值等级划分见图 7, E、D、R 三个指标在不同等级形成三维封闭空间,分别对应 5 个不同的预警等级。

### 3.3 阈值模型精度检验

选取拟合样本外的 15 起滑坡事件为验证集,分别

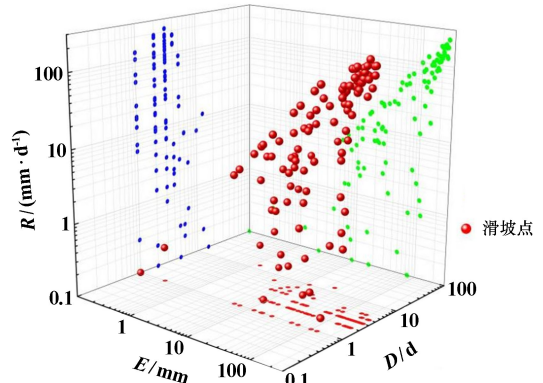


图 6 E-D-R 三维散点分布及投影

Fig.6 3D scatter plot and projection of E-D-R threshold model

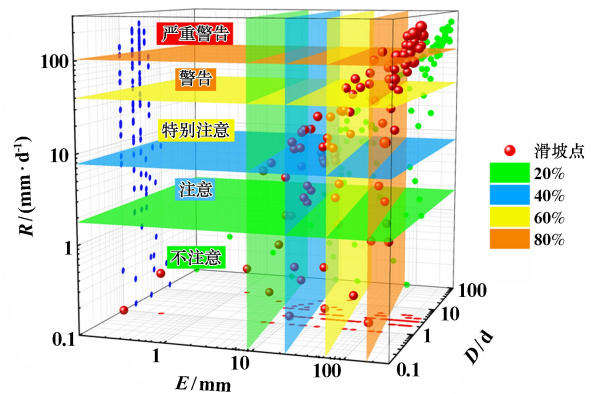


图 7 E-D-R 三维阈值等级划分

Fig.7 3D E-D-R threshold grading

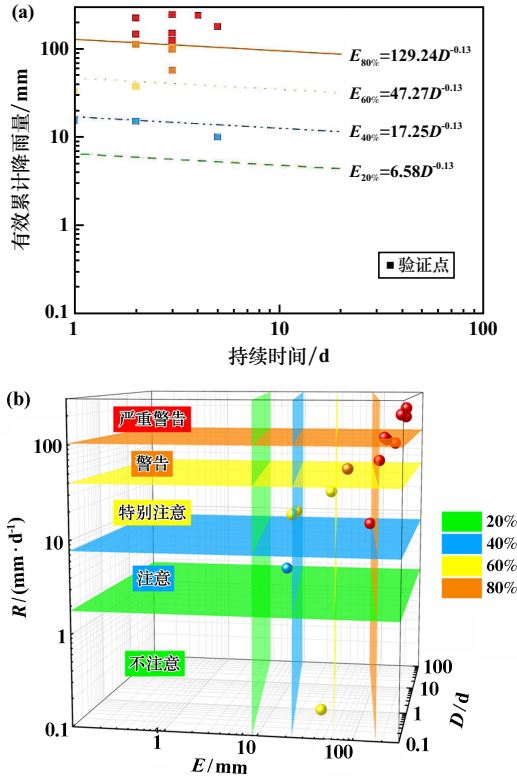
对 E-D 阈值模型和 E-D-R 阈值模型进行精度检验,结果见表 4 和图 8。表 4、图 8 结果显示: E-D 阈值模型和 E-D-R 阈值模型中,处在特别注意及以上预警等级的滑坡分别占 80.0% 和 93.3%,处在严重警告预警等级的滑坡分别占 46.7% 和 53.3%。引入第三维度指标 R 后, E-D-R 三维阈值模型的整体预警级别高于 E-D 二维阈值模型, E-D-R 三维阈值模型精度更高,在滑坡风险评估中具有更高的准确性和可靠性。

表 4 沅麻盆地不同阈值模型预警结果

Table 4 Early warning results of different threshold models for Yuanma Basin

预警等级	预警结果比例/%	
	E-D 模型	E-D-R 模型
不关注	—	—
注意	20.0	6.7
特别注意	13.3	33.3
警告	20.0	6.7
严重警告	46.7	53.3

沅麻盆地不同预警等级对应的 E-D-R 模型降雨阈值见表 5。



(a) *E-D* 二维阈值模型; (b) *E-D-R* 三维阈值模型  
图 8 阈值模型精度检验结果

Fig. 8 Accuracy verification of threshold models

表 5 沅麻盆地不同预警等级对应的 *E-D-R* 模型降雨阈值  
Table 5 Rainfall thresholds in *E-D-R* model corresponding to different warning grades in Yuanma Basin

预警等级	<i>E-D-R</i> 降雨阈值
不注意	① $E \leq 6.58D^{-0.13}$ 且 $R < 1.8$
注意	① $6.58D^{-0.13} \leq E < 17.25D^{-0.13}$ 且 $R < 1.8$
	② $E < 6.58D^{-0.13}$ 且 $1.8 \leq R < 7.8$
特别注意	① $17.25D^{-0.13} \leq E < 47.27D^{-0.13}$ 且 $R < 7.8$
	② $E < 17.25D^{-0.13}$ 且 $7.8 \leq R < 40$
警告	① $47.27D^{-0.13} \leq E < 129.27D^{-0.13}$ 且 $R < 40$
	② $E < 47.27D^{-0.13}$ 且 $40 \leq R < 104$
严重警告	① $E \geq 129.27D^{-0.13}$ 且 $R < 104$

### 4 滑坡气象预警与响应

研究区域大部分位于沅麻盆地地势较低的区域,东南部及北部两面较高,若能根据地形精准划分单元,可以极大程度提高预警准确性;研究区域内共 50 个乡镇,若根据乡镇边界划分单元,更便于灾害防控及管理工作的开展。考虑以上两方面因素,基于泰森多边形划分方法,将沅麻盆地红层区麻阳、沅陵、泸溪 3 个县域划分为 114 个预警单元,如图 9 所示。

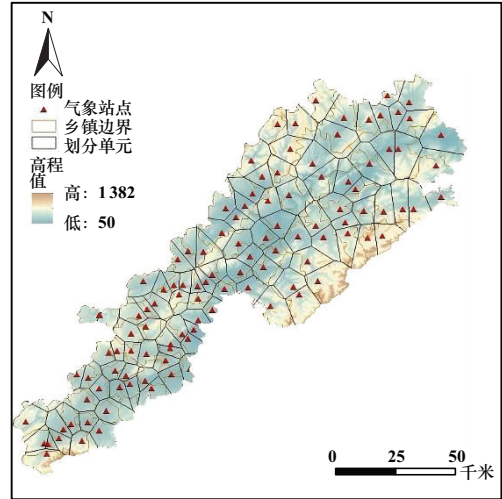


图 9 沅麻盆地气象灾害预警单元

Fig. 9 Units in Yuanma Basin with meteorological disaster warning

以 2022 年 6 月 2 日降雨为例,利用表 5 所列阈值对沅麻盆地研究区域进行滑坡灾害预警,预警结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,这个研究区有 21 个单元预警等级为不注意,25 个单元预警等级为注意,23 个单元预警等级为特别注意,22 个单元预警等级为警告,23 个单元预警等级为严重警告。各县域因降雨分布差异呈现不同的预警等级,这种方法可以实现县域级别差异性预警。

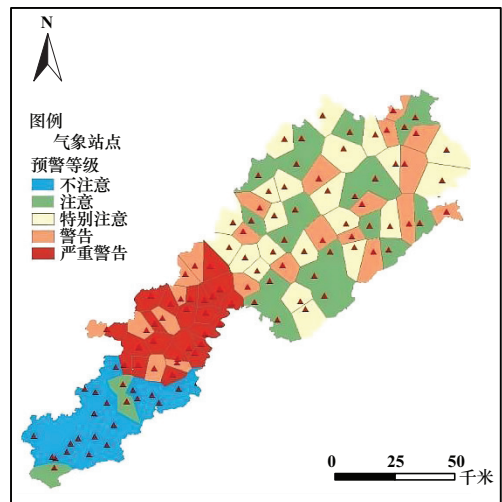


图 10 滑坡灾害预警结果

Fig. 10 Early warning grades of landslide hazard

网格化、精细化预警单元划分,不仅增强了滑坡灾害气象预警的精细化管控能力,而且能在未来预警预报中,结合预报雨量和降雨信息,实现县域级别差异化预警,有利于提高预警预报准确性,降低地质灾害防控成本。

## 5 结论

1) 沅麻盆地研究区域内,滑坡前4 d至滑坡当日为诱发滑坡的关键降雨时期,降雨有效系数 $\alpha$ 取0.5较为合适。

2) 提出了*E-D-R*三维阈值模型,相较于*E-D*二维阈值模型,*E-D-R*三维阈值模型精度更高,在滑坡风险评估中具有更高的准确性和可靠性。

3) 网格化、精细化预警单元划分,不仅能增强滑坡灾害气象预警的精细化管控能力,而且能在未来预警预报中,结合预报雨量和降雨信息,实现单元差异化预警。

### 参考文献(References):

- [1] 张桂荣,殷坤龙. 区域滑坡空间预测方法研究及结果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(23):4297-4302.  
ZHANG Guirong, YIN Kunlong. Study on spatial prediction method for regional landslides and results analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(23):4297-4302.
- [2] 刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等. 基于*I-D-R*阈值模型的滑坡气象预警[J]. 地球科学, 2024,49(3):1039-1051.  
LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on *I-D-R* threshold model[J]. Earth Science, 2024,49(3):1039-1051.
- [3] 陈洪凯,魏来,谭玲. 降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012,31(5):990-996.  
CHEN Hongkai, WEI Lai, TAN Ling. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-induced landslide[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2012,31(5):990-996.
- [4] 龚泉冰,殷坤龙,肖常贵,等. 基于*I-D*阈值的滑坡气象预警双指标模型[J]. 地质科技通报, 2024,43(1):262-274.  
GONG Quanbing, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Double-index model of landslide meteorological warning based on the *I-D* threshold[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024,43(1):262-274.
- [5] CAMPBELL R H. Debris flows originating from soil slips during rainstorms in Southern California[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1974,7(4):339-349.
- [6] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 1980,62(1/2):23-27.
- [7] 刘海知,徐辉,包红军,等. 区域降雨诱发滑坡阈值特征分析[J]. 自然灾害学报, 2021,30(4):181-190.  
LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Characteristics analysis of rainfall-induced landslide thresholds in local regions[J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(4):181-190.
- [8] 周剑,汤明高,许强,等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J]. 山地学报, 2022,40(6):847-858.  
ZHOU Jian, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold[J]. Mountain Research, 2022,40(6):847-858.

- [9] 张玉成,杨光华,张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学, 2007,22(1):82-85.  
ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Yuxing. Research on the relationship between landslide and rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2007,22(1):82-85.
- [10] 陈雅娜,李明波. 基于综合遥感识别的地质灾害新“三查”体系示范研究及应用:以湖南省沅麻盆地“红层”区为例[J]. 陕西地质, 2023,41(1):105-110.  
CHEN Yana, LI Mingbo. Demonstration and application of new “three check” system based on comprehensive remote sensing recognition of geological hazards-taking the “red layer” area of Yuanma Basin of Hunan Province as an example[J]. Geology of Shaanxi, 2023,41(1):105-110.
- [11] 刘磊磊,肖浩,王璨,等. 湖南红层地区滑坡地质灾害致灾因子敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):169-174.  
LIU Leilei, XIAO Hao, WANG Can, et al. Landslide analysis based on susceptibility to factors causing geological disasters in red beds area of Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):169-174.
- [12] 李俊. 湖南红层地区顺层岩质高陡边坡稳定性及处治技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.  
LI Jun. Stability study and processing technical of the high steep rock bedded slope in red beds area of Hunan Province[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [13] 林巍,李远耀,徐勇,等. 湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J]. 长江科学院院报, 2020,37(2):48-54.  
LIN Wei, LI Yuanyao, XU Yong, et al. Rainfall thresholds of rainfall-triggered landslides in Cili County, Hunan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(2):48-54.
- [14] 刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等. 基于*I-D-R*阈值模型的滑坡气象预警[J]. 地球科学, 2024,49(3):1039-1051.  
LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on *I-D-R* Threshold Model[J]. Earth Science, 2024,49(3):1039-1051.
- [15] CROZIER M J. Landslides: causes, consequences and environment[M]. London: Croom Helm Ltd., 1986.
- [16] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007,98(3/4):239-267.
- [17] 中国气象局. 暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级: QX/T 487—2019[S]. 北京:气象出版社, 2019.  
China Meteorological Administration. Meteorological risk early warning levels of geological disaster induced by torrential rain: QX/T 487—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2019.

引用本文:龙长聪,李军伟,蒋鑫,等. 沅麻盆地降雨诱发滑坡阈值模型研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):22-28.

LONG Changcong, LI Junwei, JIANG Xin, et al. Threshold model for rainfall-induced landslides in Yuanma Basin[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):22-28.