

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.233



## 基于 $I-D-R$ 阈值模型的滑坡气象预警

刘谢攀<sup>1,2</sup>, 殷坤龙<sup>1\*</sup>, 肖常贵<sup>3,4</sup>, 陈丽霞<sup>5</sup>, 曾韬睿<sup>6</sup>, 李 焯<sup>1</sup>,  
刘真意<sup>1</sup>, 龚泉冰<sup>1</sup>, 陈卫群<sup>7</sup>

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
2. 西安测绘总站, 陕西西安 710054
3. 浙江省地质环境监测中心, 浙江杭州 310007
4. 自然资源部浙江地质灾害野外科学观测研究站, 浙江杭州 310007
5. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074
6. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074
7. 磐安县自然资源和规划局, 浙江磐安 322300

**摘要:** 建立滑坡灾害多维度气象预警判据和划分“网格化”预警单元能够为滑坡灾害气象预警提供科学依据。本文以浙江省金华市磐安县 205 个降雨型滑坡为研究对象, 首先, 基于平均有效降雨强度-降雨历时 ( $I-D$ ) 阈值模型, 采用普通最小二乘回归 (OLSQ) 和分位数回归 (QR) 划分临界阈值曲线; 其次, 引入当日降雨量 ( $R$ ), 进一步优化  $I-D$  阈值模型, 建立  $I-D-R$  阈值模型, 采用不同参数估计方法对比不同阈值模型精度, 选择最优阈值模型作为磐安县滑坡灾害气象预警判据; 最后, 基于降雨分布的差异性, 在划分地形单元的基础上利用泰森多边形 (VD) 建立了乡镇级别的“网格化”预警单元。结果显示: (1)  $I-D-R$  阈值模型相比于  $I-D$  阈值模型具有更好的预警精度, 且基于 QR 的  $I-D-R$  阈值模型效果更好, 警告及以上阈值等级精度提升到 50%, 特别注意及以上阈值等级精度提升到 88.9%; (2) 采用基于 QR 的  $I-D-R$  降雨阈值作为磐安县 51 个预警单元四级气象预警 (红、橙、黄、蓝) 的判据, 并提出相应的应急响应措施。研究成果提供了一种新的阈值模型, 能够为磐安县区域气象预警提供借鉴与参考。

**关键词:** 滑坡; 气象预警; 降雨阈值; 最小二乘回归; 分位数回归;  $I-D-R$  阈值模型; 工程地质。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2024)03-1039-13

收稿日期: 2022-04-29

### Meteorological Early Warning of Landslide Based on $I-D-R$ Threshold Model

Liu Xiepan<sup>1,2</sup>, Yin Kunlong<sup>1\*</sup>, Xiao Changgui<sup>3,4</sup>, Chen Lixia<sup>5</sup>, Zeng Taorui<sup>6</sup>, Li Ye<sup>1</sup>,  
Liu Zhenyi<sup>1</sup>, Gong Quanbing<sup>1</sup>, Chen Weiqun<sup>7</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Xi'an Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China
3. Zhejiang Center of Geological Environment Monitoring, Hangzhou 310007, China
4. Observation & Research Station of Geohazards in Zhejiang, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310007, China
5. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**基金项目:** 磐安县地质灾害风险隐患双控试点(预警系统科研项目)(No. PACG2021-CS-002)。

**作者简介:** 刘谢攀 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害气象预警和风险评估研究。ORCID: 0000-0002-1656-6549. E-mail: liuxiepan@cug.edu.cn

\* **通讯作者:** 殷坤龙, ORCID: 0000-0002-3547-1633. E-mail: yinkl@cug.edu.cn

**引用格式:** 刘谢攀, 殷坤龙, 肖常贵, 陈丽霞, 曾韬睿, 李焯, 刘真意, 龚泉冰, 陈卫群, 2024. 基于  $I-D-R$  阈值模型的滑坡气象预警. 地球科学, 49(3): 1039-1051.

**Citation:** Liu Xiepan, Yin Kunlong, Xiao Changgui, Chen Lixia, Zeng Taorui, Li Ye, Liu Zhenyi, Gong Quanbing, Chen Weiqun, 2024. Meteorological Early Warning of Landslide Based on  $I-D-R$  Threshold Model. *Earth Science*, 49(3): 1039-1051.

6. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

7. Pan'an Bureau of Planning and Natural Resources, Pan'an 322300, China

**Abstract:** The establishment of the multi-dimensional meteorological early warning criterion of landslide and the division of the "grid" early warning unit can provide a scientific basis for the landslide early warning, for the purpose of which 205 rainfall-induced landslides in Panan County, Zhejiang Province were studied in this paper. Firstly, based on the average effective rainfall intensity-diachronic (*I-D*) threshold model, the critical threshold curves were divided by ordinary least squares regression (OLSQ) and quantile regression (QR). Secondly, the *I-D-R* threshold model was established by the *I-D* threshold model optimized by considering the daily rainfall (*R*), and different parameter estimation methods were used to compare the accuracy of different threshold models. The optimal threshold model was considered as the meteorological early warning criterion for landslide disasters in Pan'an County. Finally, considering the difference of rainfall distribution, the township level grid early warning unit was established by the terrain zoning and Voronoi diagram (VD) of Pan'an. The results show that: (1) The *I-D-R* threshold model has better early warning accuracy than the *I-D* model. The *I-D-R* threshold model based on QR has a better warning ability, and the accuracy of the threshold degree of warning and above is increased to 50%, and the accuracy of the threshold level of special attention and above is increased to 88.9%; (2) the rainfall conditions with *I-D-R* based on QR rainfall threshold are proposed as the early warning criteria (red, orange, yellow and blue) of 51 early warning units in Pan'an County, and the emergency response measures are put forward. A new threshold model is established on the basis of the research results, which can provide reference for regional meteorological early warning in Pan'an County.

**Key words:** landslide; meteorological early warning; rainfall threshold; ordinary least square regression; quantile regression; *I-D-R* threshold model; engineering geology.

## 0 引言

降雨通过改变土体中的孔隙压力,使得土体有效应力及基质吸力降低,从而削弱岩土体的抗剪强度,是诱发滑坡的重要因素.据 2005 年到 2020 年的全国地质通报,地质灾害中滑坡占比高达 71.1%,给人民生命财产安全造成巨大威胁.已有研究表明 90% 以上的滑坡变形失稳都与降雨有着密不可分的关系(Bai *et al.*, 2014),大量研究人员利用降雨特征构建预警模型(Melillo *et al.*, 2015; 郭子正等, 2020; Kim *et al.*, 2021)来指导防灾减灾工程.根据降雨阈值进行预警是滑坡灾害常用的防控手段(Bai *et al.*, 2014),能够为政府部门在规避地质灾害方面提供指导,有效降低滑坡的危害性.

目前,滑坡降雨阈值研究主要包括两种思路:一是基于物理模型及水文模型的确定性方法,二是基于滑坡编录与降雨事件统计的经验性方法.确定性方法一般需要获取岩土体的参数,因地质体存在空间分布上的差异,很难获取广泛而准确的参数,且降雨过程中岩土参数的变化过程也较为复杂,因此很难将降雨诱发滑坡的过程进行量化(Irawan *et al.*, 2019),不适用于区域滑坡灾害预警.经验性方法采用统计分析,主要通过历史滑坡

和降雨之间的关系得出,未直接考虑物理过程,通过降雨这一主要诱因来间接预测滑坡的发生与否(Rosi *et al.*, 2012).因其数据获取方便、推广性强、适用效果佳等优势被世界各地研究人员广泛应用(Lee *et al.*, 2013; Martinović *et al.*, 2018).经验性降雨阈值研究早期通过建立滑坡事件与累计降雨量之间的关系来建立阈值(Campbell, 1975; Lumb, 1975),随后 Caine(1980)在前人的研究基础上建立了平均降雨强度-降雨历时(*I-D*)阈值模型,被国内外学者广泛应用(Guzzetti *et al.*, 2008; Lagomarsino *et al.*, 2015; 夏梦想等, 2021).除 *I-D* 阈值模型外,常用的阈值模型包括累计降雨量-降雨历时(*E-D*)阈值模型、累计降雨量-降雨强度(*I-E*)阈值模型、基于降雨诱发滑坡的总降雨量阈值模型(Guzzetti *et al.*, 2007).大量的案例(Crozier, 1986; Glade *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2015)研究表明降雨会产生沿坡面径流和蒸发,即并非所有降雨都会入渗至岩土体内部,因此以有效降雨量为指标反映降雨入渗更贴合实际.其中常用的有效降雨量模型是由 Crozier(1986)提出的幂指数模型,被广泛地应用于降雨阈值研究(吴益平等, 2014; 林巍等, 2020; 黄发明等, 2021).

鉴于降雨阈值研究大多采用 *E-D*、*I-D*、*I-E* 等二维指标(Hong *et al.*, 2005; 胡磊等, 2021; 夏梦想

等, 2021), 在一定程度上描述的是降雨过程中的整体均值, 而无法体现降雨过程中的变化特征. 本文基于I-D阈值模型, 引入滑坡当日降雨量R作为第3个维度指标, 建立三维尺度下的平均有效降雨强度-降雨历时-当日降雨量(I-D-R)阈值模型. R的引入可以有效避免因当日降雨与前期降雨差异较大而造成平均有效降雨强度偏小的结果, 其可作为一个变化特征指标或者强度指标, 多维度的降雨指标使得降雨阈值划分从平面分割转入空间立体分割, 从而构建更加精准的模型. 本文将采用最小二乘回归(OLSR)、分位数回归(QR)两种参数估计来划分临界降雨阈值曲线, 研究两种参数估计方法下I-D和I-D-R阈值模型的适用性, 以滑坡验证集的精度检验为标准, 选择最优阈值模型作为磐安县滑坡气象预警判据.

基于降雨阈值研究成果, 结合实际情况下的多降雨站点的监测数据进行实时动态预警; 而以往的县域预警常以单站点或多站点平均降雨量为主要输入信息, 忽略了因降雨时空分布不均匀而导致预警范围偏差较大的问题. 本文基于磐安县的地形地貌特点及雨量站点分布, 将磐安县划分为更加精细的乡镇级预警单元, 并进行“网格化”管理, 实现预警区域精细化, 以达到更好的预警效果. 研究结果将为浙江省磐安县滑坡灾害的气象预警提供科学依据和借鉴.

## 1 研究方法

### 1.1 最小二乘回归与分位数回归

OLSR与QR是应用较广的参数估计方法. OLSR用于描述自变量对于因变量的均值影响, 假设条件较为严格; QR则是描述自变量对于因变量局部变化的影响, 不仅衡量了回归变量对条件分布中心的影响, 还考虑了回归变量对条件分布上下尾的影响. 目前分位数回归已经越来越被广泛地应用于各个领域, 例如降雨阈值方面(彭启园, 2020).

本文将使用两种参数估计方法进行不同等级的临界降雨量划分, 具体原理如下(Koenker and Hallock, 2001; 杨丽红和周正朝, 2014):

假设随机变量Y的分布函数为:

$$F(y) = P(Y \leq y), \quad (1)$$

则Y的第 $\tau$ 分位数为:

$$Q(\tau) = \inf \{ y: F(y) \geq \tau \}, \quad (2)$$

其中, 中位数可以表示为 $Q(1/2)$ , 是特殊的分位数.

对于Y的一组随机样本 $\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ , 最小二乘回归法的原理是使残差平方和最小, 即 $\min \sum (y_i - \xi)^2$ 为最优解, 其中 $\xi$ 为估计值, 而中位数回归原理是使最小化残差绝对值和最小为最优解, 即:

$$\min_{\xi \in R} \sum_{i=1}^n |y_i - \xi|, \quad (3)$$

对于任意的第 $\tau$ 分位数, 求解:

$$\min_{\xi \in R} \left[ \sum_{i \in |i, v_i| \geq \xi} \tau |y_i - \xi| + \sum_{i \in |i, v_i| < \xi} (1 - \tau) |y_i - \xi| \right], \quad (4)$$

即:

$$\min_{\xi \in R} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - \xi), \quad (5)$$

其中,  $\rho$ 为损失函数:

$$\rho_{\tau}(u) = (\tau - 1)uH_{(u < 0)}, \quad (6)$$

其中,  $H$ 为示性函数:

$$H(u < 0) = \begin{cases} H, & u < 0 \\ 0, & u \geq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

对于一般线性条件均值函数:

$$E(Y|X=x) = x'\beta, \quad (8)$$

通过求解

$$\beta(\tau) = \arg \min_{\beta \in R} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i'\beta), \quad (9)$$

得到参数估计值. 对于任意的 $\tau \in (0, 1)$ , 参数 $\beta(\tau)$ 即为第 $\tau$ 回归分位数.

### 1.2 I-D-R降雨阈值模型

I-D-R降雨阈值模型是基于I-D阈值模型, 在第3个维度引入指标R的改进阈值模型. 考虑到I是一个平均指标, 无法体现降雨峰值强度, 当滑坡事件发生当天的降雨量较大时, 或者与前期降雨量差异较大时, 会造成因降雨历时的拉长致使平均有效降雨强度大幅降低的情况, 或可出现滑坡灾害的漏报; 同时, 也有研究表明递增型降雨危害最大(罗渝等, 2014; 张勇等, 2020), 即滑坡临滑前的日降雨尤为重要; 且考虑到前期降雨会随着时间推移折减, 强度影响力下降. 因此, 本文第3个维度采用指标R来作为强度峰值的最佳评价指标.

为研究I-D-R阈值模型, 首先必须明确有效降雨量与I-D阈值模型. 有效降雨量是指在一次降雨过程中, 除坡面径流及蒸发外真正入渗并作用于滑坡体的雨量. 因此直接使用累计降雨量不宜作为阈值的有效指标. 本文使用Crozier(1986)提出的有效降雨量公式, 即

$$P_e = \sum_{i=1}^n \alpha^{n-1} P_n, \quad (10)$$

其中,  $P_e$  为有效降雨量;  $P_n$  为前  $n$  日降雨量;  $\alpha$  为有效降雨系数,  $n$  为降雨时间.

$I$ - $D$  阈值模型是指平均降雨强度与降雨历时两个降雨过程量满足幂指数规律, 表达形式为:

$$I = c + \beta \cdot D^\gamma, \quad (11)$$

其中,  $I$  为平均降雨强度 (mm), 数值上等于  $P_e/D$ ;  $D$  为降雨历时 (d);  $\beta$ 、 $\gamma$  为统计参数;  $c \geq 0$ .

在  $I$ - $D$  阈值模型的基础上, 引入第 3 维度指标  $R$ , 将滑坡灾害由平面展开提升到双面切割组成的空间体中. 各个等级的临界降雨指标  $I_i$ 、 $R_i$  满足下列关系式:

$$\begin{cases} I_{i-1} \leq I < I_i \\ R < R_{i-1} \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} I < I_i \\ R_{i-1} \leq R < R_i \end{cases}, \quad (12)$$

其中,  $i$  为滑坡灾害阈值等级, 且满足  $R_0$ 、 $I_0 \rightarrow 0$ ;  $R_{i(\max)}$ 、 $I_{i(\max)} \rightarrow \infty$ ;  $i=1, 2, 3, \dots$ .

### 1.3 气象预警单元划分

预警单元精细化划分有助于实现气象预警的空间辨识及滑坡灾害的精准复盘, 可根据地形地貌和泰森多边形 (VD) 来确定. 考虑到地形是影响降雨不均匀分布的重要因素, 首先以大型分水岭划分大的地形地貌单元, 再以降雨站位置为对象, 将所有相邻雨量站连接成三角形, 并绘制这些三角形的垂直平分线, 每个降雨站点的垂直平分线就可以形成一个多边形, 即为 VD. 它需满足如下条件: (1) 每个多边形内有且只有一个降雨站; (2) 每个多边形范围内的任意一点距离单元内部降雨站最近; (3) 边界上的点到相邻两个降雨站距离相同 (Wang *et al.*, 2014). VD 常被应用于流域径流及降雨量的确定 (Croley and Hartmann, 1985; Zhao *et al.*, 2019). 基于磐安县丰富的雨量站, 通过地形地貌及泰森多边形能够实现乡镇级别的“网格化”预警单元划分, 从而根据预报雨量及雨量站的降雨信息实现预警差异化.

## 2 研究区域概况

### 2.1 自然地理特征

磐安县位于浙江省中部, 金华市东部, 地处北纬  $28^\circ 49' 44'' \sim 29^\circ 19' 21''$ , 东经  $120^\circ 17' 24'' \sim 120^\circ 46' 02''$ , 县域面积约  $1\,195\text{ km}^2$ . 地形属浙东盆地丘陵区与低山区的过渡地带, 总体地势东高西低, 区内 NE-SW 向的大盘山脉是重要的分水岭 (图 1). 磐安县境内出露地层主要是燕山构造层, 以中生代火山岩、沉积岩为主, 出露面积约占磐安县面积的

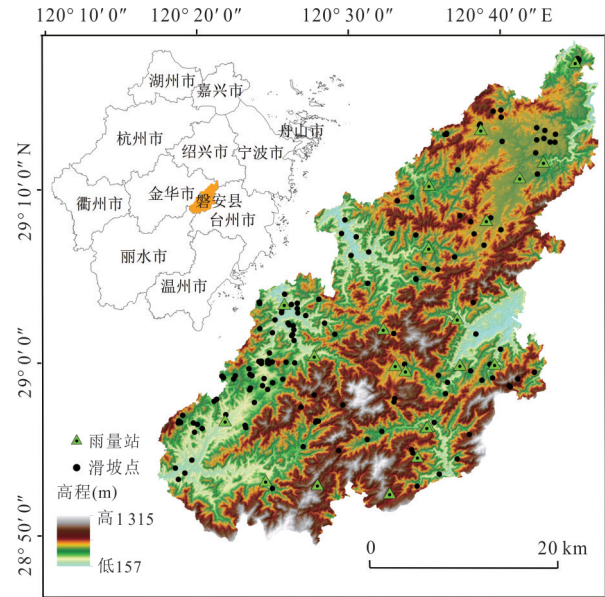


图 1 浙江省磐安县地理位置及灾害点分布

Fig.1 Geographical location and distribution of disaster in Pan'an County, Zhejiang Province

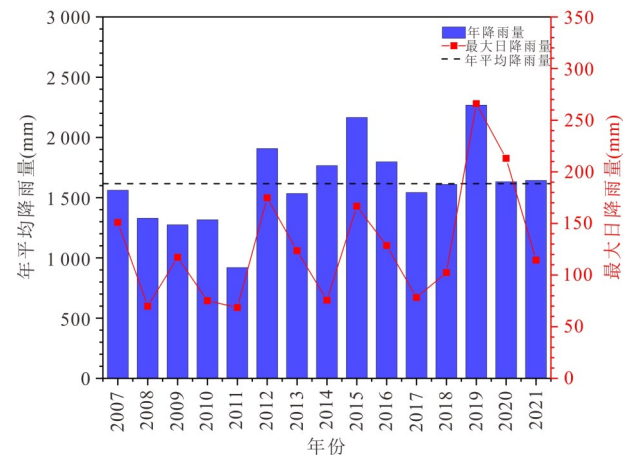


图 2 磐安县年平均降雨量与最大日降雨量

Fig.2 Annual average rainfall and maximum daily rainfall in Pan'an County

2021年降雨量统计截至到8月12日

94%, 地质构造以断裂构造为主, 褶皱构造不发育, 是浙江省地质灾害多发县之一.

磐安县属亚热带季风气候, 雨量充沛. 根据磐安县大盘气象监测站 2007 年到 2020 年的降雨数据 (图 2) 可知, 其年降雨量在  $919\text{ mm}$  与  $2\,268\text{ mm}$  之间, 年平均降雨量为  $1\,616\text{ mm}$ . 日降雨量超过  $100\text{ mm}$  的基本上都是由台风等极端天气引起的短时强降雨, 尤其是 2019 年“利奇马”台风及 2020 年“黑格尔”台风期间, 大盘气象监测站的最大日降雨量达到  $200\text{ mm}$  以

上.区内充沛的雨水是诱发滑坡的重要因素.

### 2.2 降雨型滑坡编录

降雨型滑坡数据编录是研究降雨阈值的基础,其主要内容包括滑坡发生时间、地理位置、所属降雨站点、所属降雨过程及现场描述等基本信息.本文滑坡编录数据主要来源于浙江省磐安县资源与规划局的历史滑坡灾害报告与野外调查.在这里,需要明确滑坡事件与降雨事件这两个概念.磐安县同一天发生的多起滑坡灾害,记为一次滑坡事件(林巍等, 2020),区内2007年到2021年间有明确时间与位置的滑坡点205个,共计90次滑坡事件,考虑到2016年之前的降雨数据不完善,滑坡灾害信息不完整,故将2016之前的18次滑坡事件(52个滑坡点)作为验证集.区内目前可收集到51个气象雨量站的资料,用于后续预警单元划分,详见后文预警单元划分.由于建站时间不一,为保持数据统一,采用数据齐全的22个气象雨量站(图1)数据,依据就近原则获取滑坡灾害的降雨过程.降雨阈值研究中对于降雨事件目前没有统一的划分标准,笔者在李长江等(2010)的基础上将降雨事件定义为从日降雨量大于等于4 mm作为降雨事件的开始,直到连续两天日降雨量小于4 mm结束(图3).

### 2.3 滑坡与降雨的相关性

磐安县全年降雨主要集中在5~9月份,月平均降雨量达150 mm以上,统计区内2007年到2021年记录明确的滑坡灾害点153处,6~8月份的滑坡比例高达77%(图4),可以看出滑坡灾害与降雨有很大的一致性,可见降雨是诱发滑坡发生的重要因素.

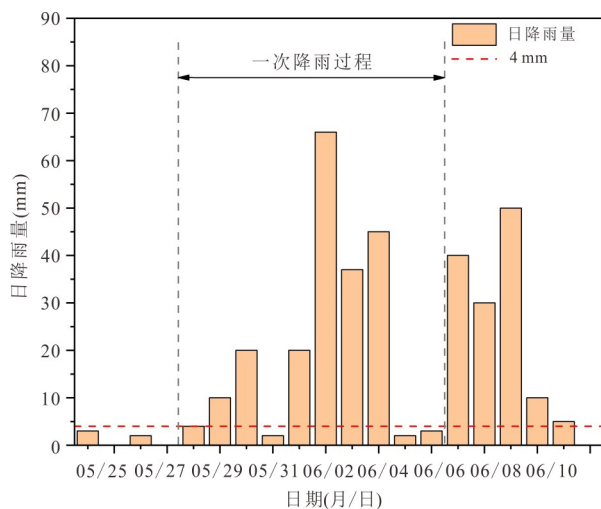


图3 降雨事件划分示意

Fig.3 Schematic diagram of rainfall event division

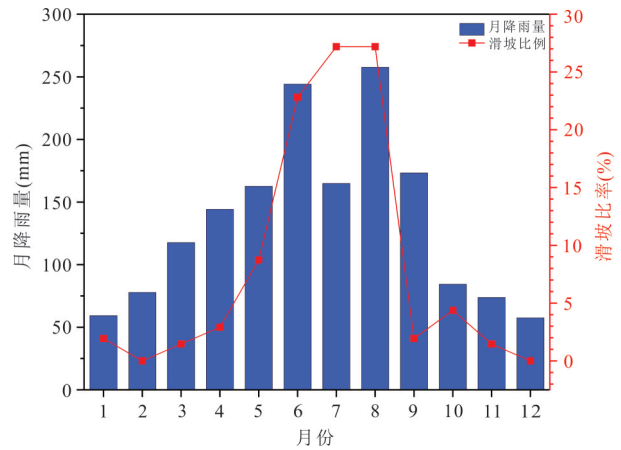


图4 磐安县月平均降雨量与滑坡比例分布

Fig.4 Distribution of monthly average rainfall and landslide ratio in Pan'an County

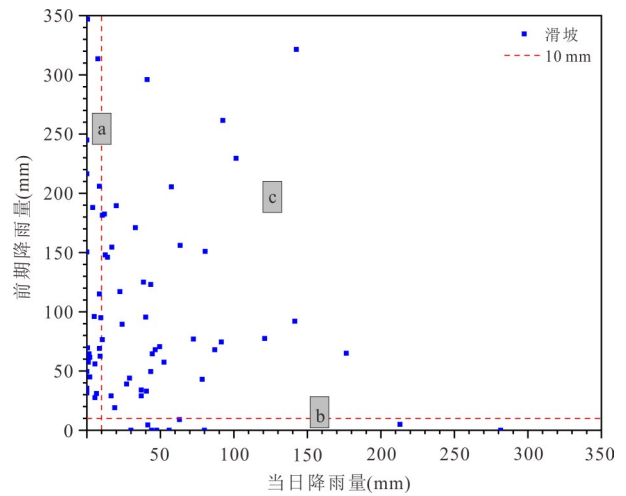


图5 磐安县滑坡灾害当日降雨量与前期降雨量

Fig.5 Daily rainfall and early rainfall of landslide disaster in Pan'an County

为了明确磐安县滑坡灾害的降雨特征,笔者统计了2016年到2021年的72次滑坡事件的当日降雨量与前期降雨量关系(图5).假设日降雨量小于10 mm则认为滑坡灾害与当日降雨量关系不大,前期降雨量同理.可以看出,72次滑坡灾害可被分为3个区域.a区域的滑坡主要由前期降雨量引起;b区域的滑坡主要由当日降雨量引起;而大部分滑坡则是由前期降雨和当日降雨共同作用引起的(c区域).因此引入有效降雨量模型能够代表区域滑坡的降雨特征.

磐安县的滑坡灾害与前期降雨有着密不可分的关系,本文使用Crozier(1986)提出的有效降雨量公式,其中降雨系数是能够反映水的排泄、蒸发及入渗量的重要参数.据前人研究,浙江省的降雨系数取0.8(张桂荣等, 2005; 吴益平等, 2009; 冯杭建

等, 2016) 时更能准确地反映有效降雨的特征. 因此, 磐安县的降雨系数取值 0.8.

### 3 研究结果

#### 3.1 I-D-R 阈值模型

首先将 72 次滑坡事件的降雨特征值  $I$ 、 $D$  绘制到  $I$ - $D$  双对数坐标中, 采用 OLSR 与 QR 分别进行不同概率降雨临界值的确定 (图 6). 不同概率的阈值曲线旨在提高降雨阈值预警的合理性, 降雨引发滑坡本身就是一个随机小概率事件, 如果仅采用最低阈值来预警地质灾害, 会产生许多无效的预警, 降低公众对于预警的认知, 也会造成防控工作资源的浪费, 不利于防灾减灾的发展. 本文参考《暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级》(QX/T487-2019) 中关于有效雨量致灾概率的划分标准 (20%、40%、60%、80%) 将研究区分为 5 个预警等级: 不注意 (<20%)、注意 (20%~40%)、特别注意 (40%~60%)、警告 (60%~80%)、严重警告 ( $\geq 80\%$ ), 各滑坡概率表示在所有发生的滑坡中降雨超过某界限所触发的滑坡数量比例 (黄发明等, 2022). 通过 OLSR 与 QR 两种参数拟合, 得到各个等级的降雨阈值方程 (表 1).

从结果可以看出, OLSR 对小概率降雨事件及台风天气带来的极端降雨条件进行了弱化, 采用符合整体规律的分布趋势; 而 QR 更注重不同百分位下的滑坡灾害的降雨特征分布规律, 更加符合事实.

基于上述  $I$ - $D$  阈值模型, 引入第 3 维度降雨指标  $R$  建立  $I$ - $D$ - $R$  阈值模型, 其中降雨指标  $R$  取值等于  $I$ - $D$  阈值模型中降雨历时为 1 d 时对应的有效降雨量. 将各级  $I$ - $D$  阈值方程及  $R$  的划分共同组成  $I$ - $D$ - $R$  三维阈值模型.  $I$ 、 $D$ 、 $R$  三个指标在视觉上形成封闭的“箱体”, 不同等级之间组成“嵌套”关系, 如图 7 所示, 图 7a、图 7b 展示的是  $I$ - $D$ - $R$  阈值模型概化图的两个视角.

#### 3.2 I-D-R 阈值模型精度检验

将验证集的 18 次滑坡事件用于阈值模型的精度检验. 首先, 对  $I$ - $D$  阈值模型进行精度检验 (图 8), 基于 OLSR 的阈值曲线分级中 (图 8a), 有 27.8% 滑坡落在严重警告级, 16.7% 的滑坡落在警告级, 38.9% 的滑坡落在特别注意级, 16.7% 的滑坡落在注意级; 基于 QR 的阈值曲线分级中 (图 8b), 有 33.3% 的滑坡落在严重警告级, 11.1% 的滑坡落在警告级, 38.9% 的滑坡落

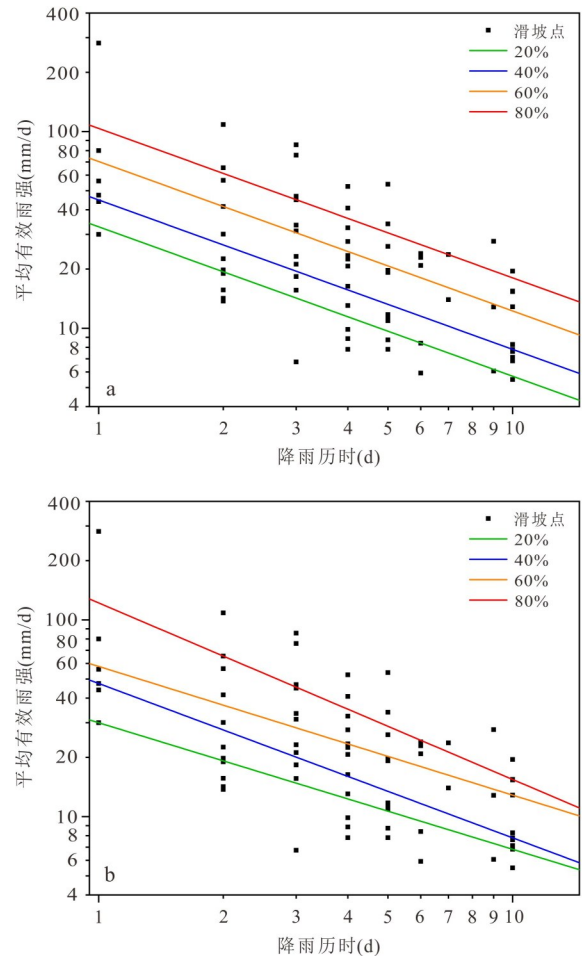


图 6 基于 OLSR 和 QR 方法划分的临界降雨阈值曲线  
Fig.6 Critical rainfall threshold curve based on OLSR and QR methods  
a. OLSR; b. QR

表 1 基于 OLSR 和 QR 方法划分的临界降雨阈值方程  
Table 1 critical rainfall threshold equation based on OLSR and QR methods

| 阈值划分方法   | OLSR                   | QR                    |
|----------|------------------------|-----------------------|
| 20% 阈值方程 | $I=32.8D^{-0.759\ 2}$  | $I=30.0D^{-0.643\ 0}$ |
| 40% 阈值方程 | $I=44.9D^{-0.759\ 2}$  | $I=47.5D^{-0.784\ 3}$ |
| 60% 阈值方程 | $I=70.4D^{-0.759\ 2}$  | $I=58.0D^{-0.654\ 1}$ |
| 80% 阈值方程 | $I=103.7D^{-0.759\ 2}$ | $I=121.9D^{-0.89\ 7}$ |

在特别注意级, 有 16.7% 的滑坡落在注意级.

由图 9、图 10 可知,  $I$ - $D$ - $R$  阈值模型使预警效果得到一定的提升. 基于 OLSR 的阈值曲线分级中, 33.3% 的滑坡落在严重警告级 (图 9d), 11.1% 的滑坡落在警告级 (图 9c), 44.4% 的滑坡落在特别注意级 (图 9b), 11.1% 的滑坡落在注意级 (图 9a). 基于 QR 的阈值曲线分级中, 33.3% 的滑坡落在严重警告级 (图 10d), 16.7% 的滑坡落在警告级 (图 10c),

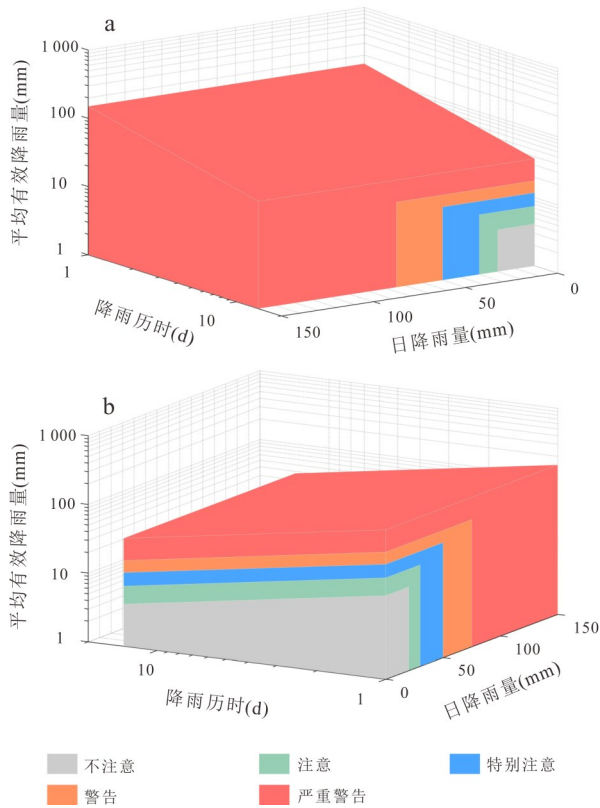


图 7 I-D-R 阈值模型概化图

Fig.7 Overview of I-D-R threshold model

38.9% 的滑坡落在特别注意级 (图 10b), 11.1% 的滑坡落在注意级 (图 10a).

分析 4 种阈值模型的预警精度, 可知:

(1) 在 I-D 阈值模型中, 基于 OLSR 和 QR 的滑坡事件处在特别注意级及以上的均为 83.3%, 但是基于 QR 的滑坡事件对严重警告级的效果较好, 提升了 5.5%.

(2) 在 I-D-R 阈值模型中, 基于 OLSR 和 QR 的滑坡事件处在特别注意级及以上的均为 88.9%, 同样也是基于 QR 的参数拟合在警告级及以上效果更好, 提升了 5.6%.

(3) 由图 8~10 中各级阈值等级的滑坡点分布可以看出, I-D-R 阈值模型与 I-D 阈值模型相比, I-D-R 阈值模型中注意级的滑坡数量更少, 较高阈值等级的滑坡数量更多. 基于 QR 的 I-D-R 阈值模型与 I-D 阈值模型相比, 在警告级以上预警精度由 44.4% 提高到 50%; 特别注意级及以上由 83.3% 提升到 88.9%.

通过上述分析可知, I-D-R 阈值模型相比 I-D 阈值模型预警精度更高, 并且基于 QR 的参数拟合优于 OLSR 的参数拟合. 从降雨指标的维度来说, 三

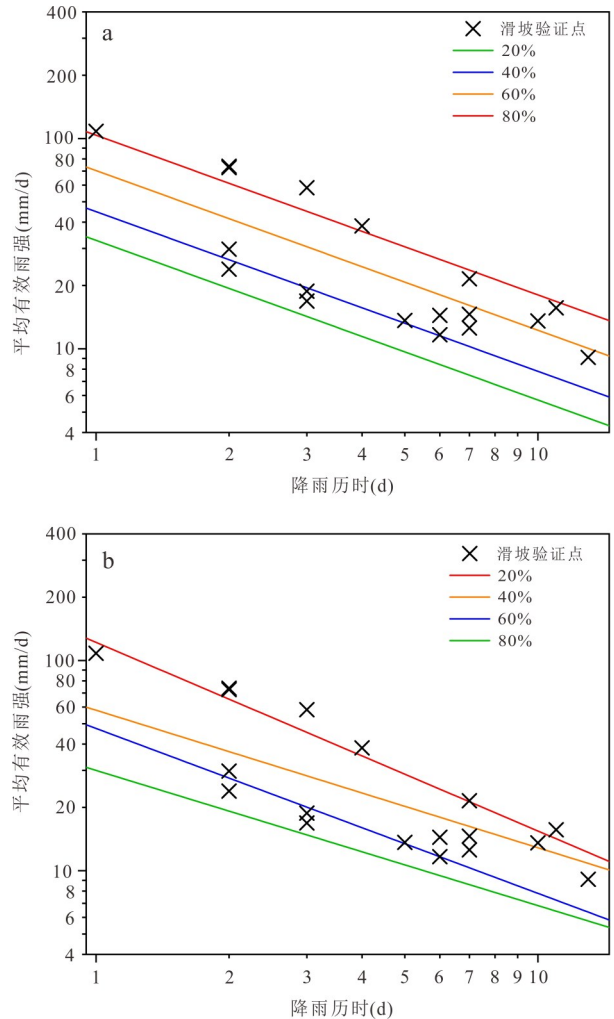


图 8 基于不同方法的阈值模型验证

Fig.8 Threshold model verification based on different methods

a. OLSR; b. QR

维阈值模型相比于传统二维阈值模型增加了一个限制条件, 由二维空间中阈值曲线划分的平面区域拓展到阈值曲面 (两个平面正交形成的“L”型折面) 划分的三维空间区域, 使得阈值划分更加精确, 具有更好的预测效果. 从参数拟合方法来说, OLSR 只能得到自变量与因变量之间整体均值趋势, 不能很好表征自变量与因变量确定分位的趋势关系, 而 QR 则能很好地反映自变量与因变量之间所有分位的趋势关系与特征, 因此 QR 分析更加符合实际.

为进一步探讨 I-D-R 阈值模型精度更高的原因, 本文将阈值等级变化点 (阈值等级有所提升的滑坡点) 在 D-R 平面视角下进行展示 (图 11), 其中颜色代表阈值等级, 与图 10 表示含义相同. 从图 11 中可以明显看出, 因 R 指标的引入, 基于 QR 的 I-D-R

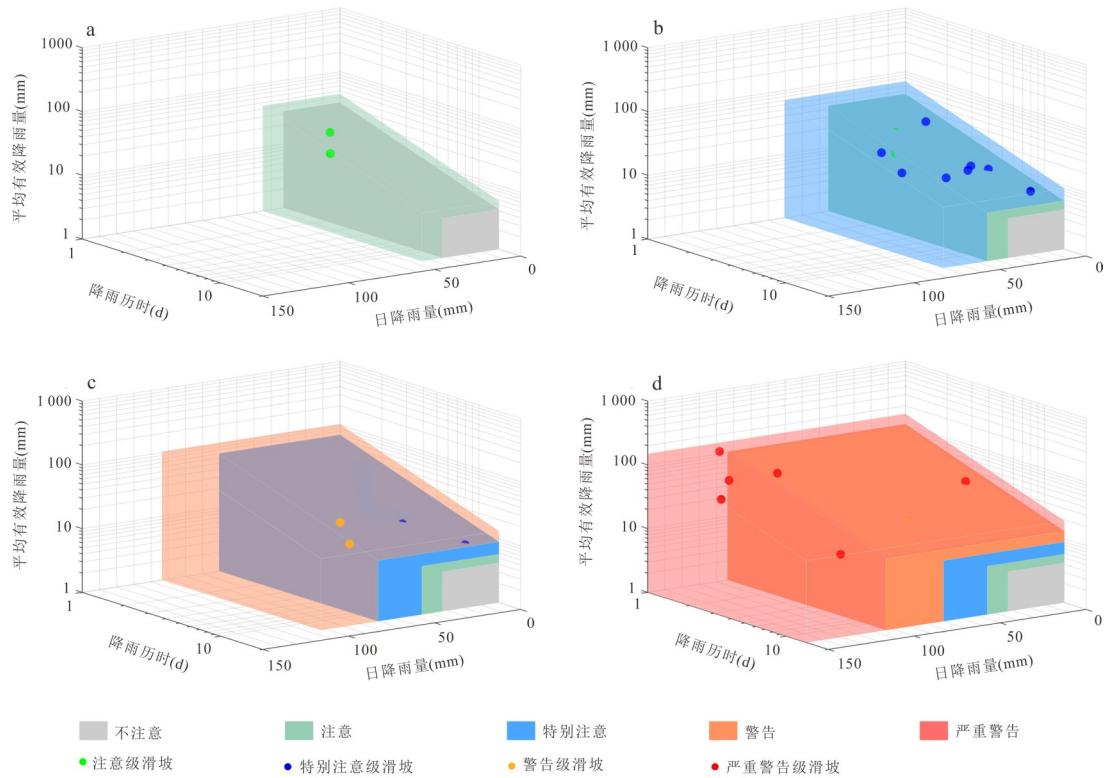


图9 基于OLSR的I-D-R阈值模型验证

Fig.9 I-D-R threshold model verification based on OLSR

a. 注意级及滑坡;b. 特别注意级及滑坡;c. 警告级及滑坡;d. 严重警告级及滑坡

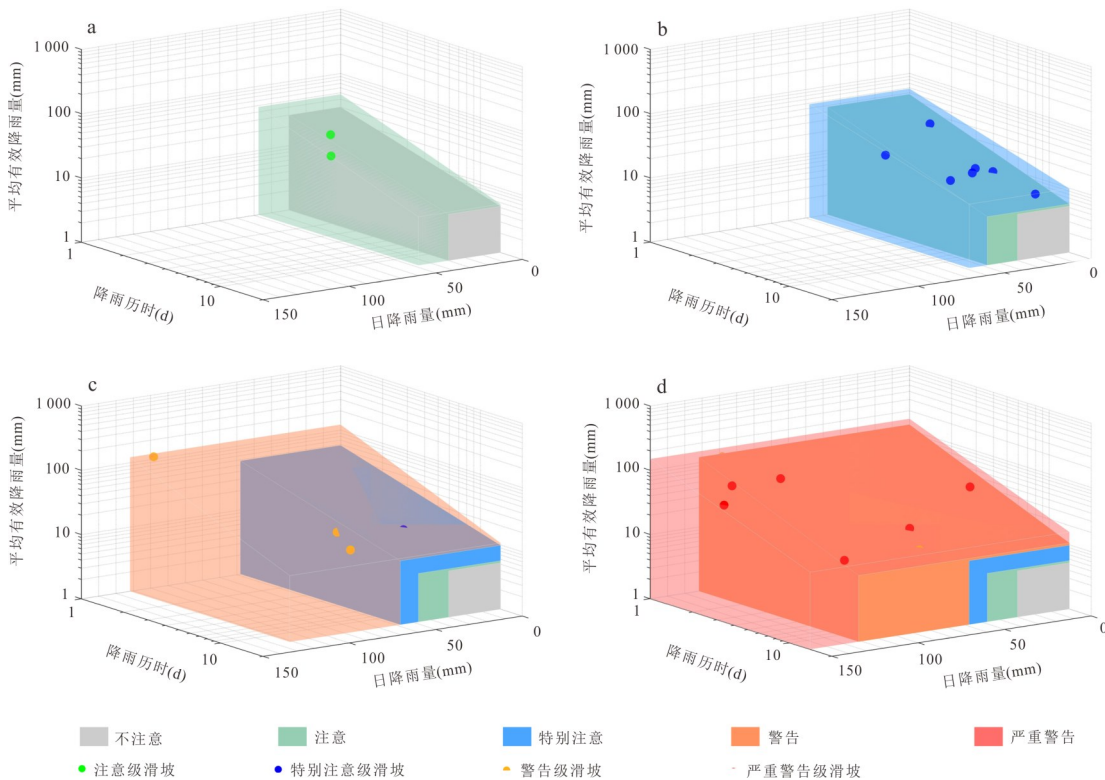


图10 基于QR的I-D-R阈值模型验证

Fig.10 I-D-R threshold model verification based on QR

a. 注意级及滑坡;b. 特别注意级及滑坡;c. 警告级及滑坡;d. 严重警告级及滑坡

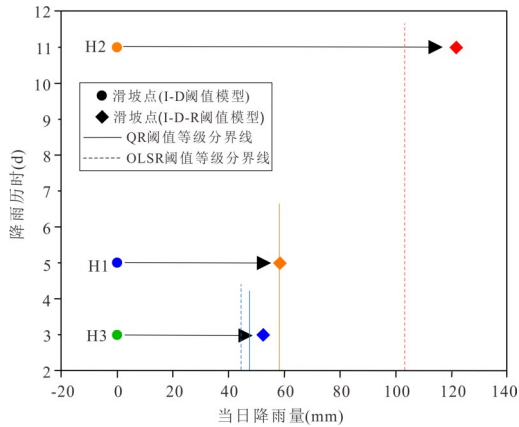


图 11 阈值等级变化点跃级过程(D-R 视角)

Fig.11 Threshold grade change point upgrade process (D-R view)

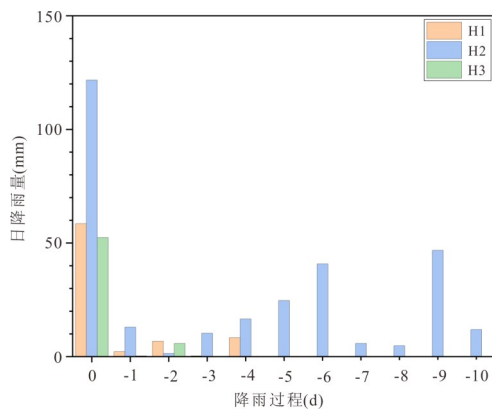


图 12 阈值等级变化点降雨过程

Fig.12 Rainfall process at threshold grade change point

阈值模型中,H1由特别注意级升级为警告级,H3由警告级升级为严重警告级;H2与H3在基于 OLSR 的 I-D-R 阈值模型中,也均由原本的阈值等级升高一级,这 3 个滑坡点是 I-D-R 阈值模型精度有所提高的直接原因.为验证 R 指标的应用场景更为广泛,本文将这 3 个阈值等级变化点的降雨过程描绘出来(图 12),它们共同特征为:整个降雨过程中日降雨量差异较大,且前期平均降雨强度较小,但当日降雨量较大,为大到暴雨.上述特点使得这 3 个滑坡点在 I-D-R 阈值模型中的精度更优,同时验证了 R 指标对强降雨引发滑坡的敏感性.I-D-R 阈值模型不仅兼顾了 I-D 阈值模型的特点,还增强了对当日强降雨的敏感性,让模型的适用性更广.

为衡量基于 QR 的 I-D-R 阈值的合理性,以日降雨量作为衡量阈值大小的标准,对降雨阈值进行重现期分析.目前只有大盘站、安文站和方前站的降雨数据最为齐全,拥有 2007 年 1 月 1 日至 2019 年 12

表 2 阈值等级重现期

Table 2 Threshold degrees return periods

| 气象站点                         | 安文站 | 大盘站 | 方前站 |
|------------------------------|-----|-----|-----|
| 严重警告天数( $\geq 121.9$ mm/d)   | 745 | 678 | 791 |
| 警告及以上天数( $\geq 58.0$ mm/d)   | 138 | 118 | 163 |
| 特别注意及以上天数( $\geq 47.5$ mm/d) | 93  | 85  | 103 |
| 注意及以上天数( $\geq 30.0$ mm/d)   | 33  | 31  | 35  |

表 3 磐安县四级阈值对应的降雨阈值

Table 3 Rainfall threshold of IV threshold degrees in Pan'an

| 阈值等级 | 降雨阈值   |
|------|--|
| 注意   | ① $30.0D^{-0.6430} \leq I < 47.5D^{-0.7843}$ 且 $R < 47.5$  |
|      | ② $I < 30.0D^{-0.6430}$ 且 $30.0 \leq R < 47.5$             |
| 特别注意 | ① $47.5D^{-0.7843} \leq I < 58.0D^{-0.6541}$ 且 $R < 58.0$  |
|      | ② $I < 47.5D^{-0.7843}$ 且 $47.5 \leq R < 58.0$             |
| 警告   | ① $58.0D^{-0.6541} \leq I < 121.9D^{-0.897}$ 且 $R < 121.9$ |
|      | ② $I < 58.0D^{-0.6541}$ 且 $58.0 \leq R < 121.9$            |
| 严重警告 | ① $I \geq 121.9D^{-0.897}$                                 |
|      | ② $I < 121.9D^{-0.897}$ 且 $R \geq 121.9$                   |

表 4 磐安县四级阈值对应的实际降雨总量

Table 4 Actual total rainfall of IV threshold degrees in Pan'an

| 阈值等级 | 宏观累计降雨总量 (mm)      |
|------|--------------------|
| 注意   | [54.6, 74.0)       |
| 特别注意 | [74.0, 104.3)      |
| 警告   | [104.3, 167.8)     |
| 严重警告 | [167.8, $\infty$ ) |

月 31 日共 13 年来的日降雨量数据,同时这 3 个站点分别分布在磐安县的东、中、西部,具有代表性,因此采用这 3 个站点进行重现期合理性验证.对 3 个站点的降雨数据进行统计分析发现,阈值等级为严重警告的重现期为 678~791 d,阈值等级为警告的重现期为 118~163 d,阈值等级为特别注意的重现期为 85~103 d,阈值等级为注意的重现期为 31~35 d(表 2).即阈值等级为严重警告出现的概率为近 2 年 1 次,阈值等级为警告及以上出现的概率一年约 3 次,阈值等级为特别注意及以上出现的概率一年少于 5 次,符合当地滑坡灾害发生的时间规律,较为合理.综上所述,采用基于 QR 的 I-D-R 降雨阈值作为磐安县滑坡灾害的气象预警判据,结果如表 3 所示.

实际降雨过程较为复杂,为更加直观表达降雨阈值大小,本文以均匀型降雨(假设每日降雨量相同)为例,反算累计降雨总量.因降雨历时 3 d 的滑坡数量最多,故选择其作为四级阈值的宏观降雨阈值参考(表 4).

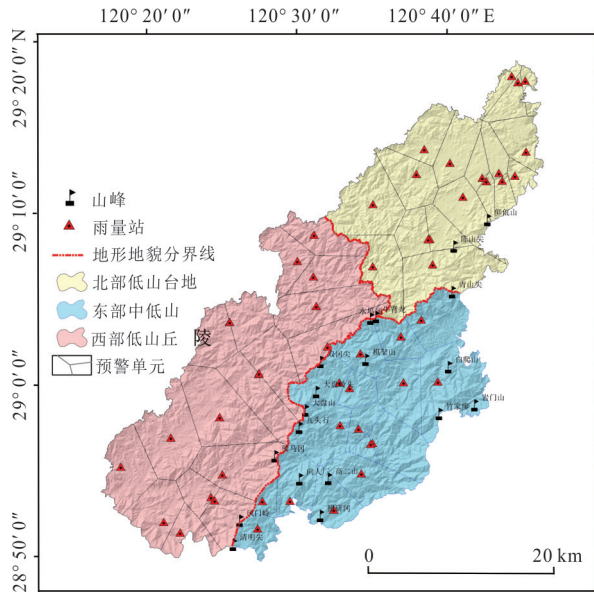


图 13 磐安县滑坡灾害气象预警单元

Fig.13 Meteorological early warning unit of landslide disaster in Pan'an County

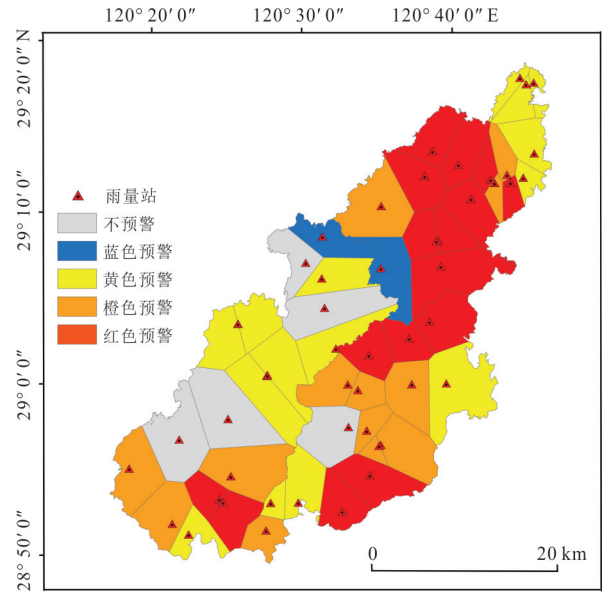


图 14 磐安县滑坡灾害气象预警(2021年7月31日)

Fig.14 Meteorological early warning of landslide disaster in Pan'an County (July 31, 2021)

### 3.3 滑坡灾害气象预警与响应

地形是影响降雨分布的重要因素,磐安县整体地势表现为东高西低,北部地势较西部丘陵区高.研究区内有一条整体走向NE-SW的大盘山脉,为重要的分水岭.从磐安南部清明尖到中部的水坞冈,沿着山脉就近的乡镇边界划分东西区域,东部主要为构造侵蚀中低山区,西部主要为侵蚀剥蚀丘陵;大盘山北脉在牛背龙处分叉,出现西北方向与东北方向延伸的山脉,边界以北主要为玄武岩台地,因此按照主要地形分布,将磐安划分为东部中低山区、西部低山丘陵、北部低山台地3个区域.在此基础上,利用ArcGIS邻域分析工具,以现有51个气象雨量站为样点生成VD,使得区域内任何一点距离雨量站最近,以获取更准确的降

雨信息,最终将磐安县划分为51个预警单元(图13).预警单元的“网格化”精细划分,有利于滑坡灾害气象预警精细化管控,在未来预警预报中根据预报雨量及雨量站的降雨信息实现县域预警差异化.当发生新的滑坡时,就可以快速地得到更加准确的降雨数据,构建降雨型滑坡数据库,对于阈值的持续动态调整具有重要意义,为研究区精细化气象预警管控提供研究思路和参考.

根据浙江省人民政府办公厅[2021]8号文件《浙江省突发地质灾害应急预案》中,预报预警级别从高到低分为红色预警(灾害发生的可能性很高)、橙色预警(灾害发生的可能性高)、黄色预警(灾害发生的可能性较高)、蓝色预警(灾害发生的可能性一般).结合当地防治部门

表 5 磐安县四级预警管控响应

Table 5 Early warning control response in Pan'an County

| 预警等级 | 等级预警管控响应  |
|------|---|
| 蓝色预警 | 发布蓝色预警,预警区域根据滑坡灾害风险情况做好防范.  |
| 黄色预警 | 发布黄色预警,群防群策员开展预报预警区域地质灾害隐患点、风险防范区的巡查与监测;做好地质灾害预防工作情况的每日统计、分析和报告.  |
| 橙色预警 | 发布橙色预警,在黄色预警响应基础上,群防群策员加强巡查与监测,职能部门加大地质灾害气象预警的密度,注意研判地质灾害发展趋势,做好地质灾害隐患点、风险防范区的人员转移等应急工作.                                    |
| 红色预警 | 发布红色预警,在橙色预警响应基础上,各职能部门24h应急值守,加强短时预报预警,派驻专业人员驻扎一线指导工作,对地质灾害隐患点、风险防范区等受灾害威胁区域的人员要安置在避灾场所,应急办公室视灾情派遣省级应急专家队伍与应急抢险救援队伍进驻预警区域. |

注:风险防范区指各预警单元内有承灾体分布的斜坡单元.

建议,将阈值等级为严重警告、警告、特别注意、注意的降雨阈值分别作为红、橙、黄、蓝4级预警的气象判据.将降雨参数带入I-D阈值模型中判别阈值等级,进而发布滑坡灾害气象预警.

基于本文提出的I-D-R阈值模型,以2021年7月31日降雨事件为例,进一步对研究区4级气象预警进行演示(图14).可以看到,整个县域因降雨分布差异呈现出不同等级的预警等级,而非整个县域处于同一预警等级,改变了目前以县域预警的现状,实现了县域预警差异性,有利于减少地质灾害管控的成本、提升地质灾害管理水平.结合浙江省人民政府办公厅[2021]8号文件《浙江省突发地质灾害应急预案》,制定不同预警等级下的应急响应方案(表5).

## 4 结论

为了提高降雨型滑坡的预警精度,本文以浙江省磐安县205个降雨型滑坡为研究对象,创新性提出I-D-R阈值模型,得到结论如下:

(1)对比OLSR与QR两种参数拟合在I-D阈值与I-D-R阈值两种阈值模型中的适用性,得到基于QR参数拟合的I-D-R降雨阈值预警效果最优,在警告等级及以上预警精度提升到50%,特别注意等级及以上可提升到88.9%,能够作为磐安县滑坡灾害气象预警判据.降雨指标R的引入改善了传统二维阈值模型的“平均化”思想,弥补当日降雨与前期降雨量差异较大时的漏报或容错,对磐安县短时强降雨的降雨特征针对性强,使得阈值模型更具有适用性和泛化能力,预警精度更高,非常具有推广意义.

(2)根据地形与乡镇区划进行地形分区,再结合VD建立更为精细的“网格化”预警单元;参照浙江省人民政府办公厅[2021]8号文件《浙江省突发地质灾害应急预案》,结合基于QR的I-D-R阈值结果确定红、橙、黄、蓝4级预警判据,并以2021年7月31日的降雨事件进行预警反演.“网格化”预警单元有利于滑坡灾害气象预警精细化管控,当降雨分布存在较大差异时,实现县域预警等级差异化.地形分区在一定意义上也反映了滑坡灾害的发育环境与发育特征,随着地质灾害数据库的完善和完整,可为浙江省“一区一阈值”的精细化地质灾害气象预警与风险管控提供思路 and 参考.

致谢:感谢匿名审稿专家提出的有益建议!

## References

- Bai, S. B., Wang, J., Thiebes, B., et al., 2014. Analysis of the Relationship of Landslide Occurrence with Rainfall: A Case Study of Wudu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(4): 1277–1285. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0939-9>
- Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, 62(1–2): 23–27. <https://doi.org/10.2307/520449>
- Campbell, R. H., 1975. Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. U.S. Geological Survey, Reston.
- Croley, T. E., Hartmann, H. C., 1985. Resolving Thiessen Polygons. *Journal of Hydrology*, 76(3–4): 363–379. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90143-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90143-X)
- Crozier, M. J., 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment. Croom Helm, London.
- Feng, H. J., Zhou, A. G., Tang, X. M., et al., 2016. Development and Distribution Characteristics of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Regional Forecast. *Earth Science*, 41(12): 2088–2099 (in Chinese with English abstract).
- Glade, T., Crozier, M., Smith, P., 2000. Applying Probability Determination to Refine Landslide - Triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”. *Pure and Applied Geophysics*, 157(6): 1059–1079. <https://doi.org/10.1007/s000240050017>
- Guo, Z. Z., Yin, K. L., Liu, Q. L., et al., 2020. Rainfall Warning of Creeping Landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir Region Based on Displacement Ratio Model. *Earth Science*, 45(2): 672–684 (in Chinese with English abstract).
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et al., 2007. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3): 239–267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et al., 2008. The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update. *Landslides*, 5(1): 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Hong, Y., Hiura, H., Shino, K., et al., 2005. The Influence of Intense Rainfall on the Activity of Large-Scale Crystalline Schist Landslides in Shikoku Island, Japan. *Landslides*, 2(2): 97–105. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0043-z>

- Hu, L., Hu, Y. Q., Sun, P., et al., 2021. A Quantitative Analysis of Disaster Threshold and Landslide Risk of Rainfall-Type Landslide in Southeast Tibet. *Journal of Catastrophology*, 36(4): 194–199 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Cao, Z. S., Yao, C., et al., 2021. Landslides Hazard Warning Based on Decision Tree and Effective Rainfall Intensity. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 55(3): 472–482 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Chen, J. W., Fan, X. M., et al., 2022. Logistic Regression Fitting of Rainfall-Induced Landslide Occurrence Probability and Continuous Landslide Hazard Prediction Modelling. *Earth Science*, 47(12): 4609–4628 (in Chinese with English abstract).
- Irawan, A. M., Virgianto, R. H., Safril, A., et al., 2019. Rainfall Threshold and Soil Moisture Indexes for the Initiation of Landslide in Banjarmangu Sub-District, Central Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 243: 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/243/1/012028>
- Kim, S. W., Chun, K. W., Kim, M., et al., 2021. Effect of Antecedent Rainfall Conditions and Their Variations on Shallow Landslide - Triggering Rainfall Thresholds in South Korea. *Landslides*, 18(2): 569–582. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01505-4>
- Koenker, R., Hallock, K. F., 2001. Quantile Regression. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4): 143–156. <https://doi.org/10.1257/jep.15.4.143>
- Lagomarsino, D., Segoni, S., Rosi, A., et al., 2015. Quantitative Comparison between Two Different Methodologies to Define Rainfall Thresholds for Landslide Forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(10): 2413–2423. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2413-2015>
- Lee, D. H., Lai, M. H., Wu, J. H., et al., 2013. Slope Management Criteria for Alishan Highway Based on Database of Heavy Rainfall-Induced Slope Failures. *Engineering Geology*, 162: 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.04.012>
- Li, C. J., Ma, T. H., Li, W., et al., 2010. Fractal Relation of Landslide Frequency and Rainfall. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 21(1): 87–93 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W., Li, Y. Y., Xu, Y., et al., 2020. Rainfall Thresholds of Rainfall-Triggered Landslides in Cili County, Hunan Province. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 37(2): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Lumb, P., 1975. Slope Failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8(1): 31–65. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1975.008.01.02>
- Luo, Y., He, S. M., He, J. C., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39(9): 1357–1363 (in Chinese with English abstract).
- Ma, T. H., Li, C. J., Lu, Z. M., et al., 2014. An Effective Antecedent Precipitation Model Derived from the Power-Law Relationship between Landslide Occurrence and Rainfall Level. *Geomorphology*, 216: 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.033>
- Martinović, K., Gavin, K., Reale, C., et al., 2018. Rainfall Thresholds as a Landslide Indicator for Engineered Slopes on the Irish Rail Network. *Geomorphology*, 306: 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.006>
- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., et al., 2015. An Algorithm for the Objective Reconstruction of Rainfall Events Responsible for Landslides. *Landslides*, 12(2): 311–320. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0471-3>
- Peng, J. B., Fan, Z. J., Wu, D., et al., 2015. Heavy Rainfall Triggered Loess - Mudstone Landslide and Subsequent Debris Flow in Tianshui, China. *Engineering Geology*, 186: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.015>
- Peng, Q. Y., 2020. Evaluation and Data Analysis of Gansu Landslide and Debris Flow Monitoring System (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Rosi, A., Segoni, S., Catani, F., et al., 2012. Statistical and Environmental Analyses for the Definition of a Regional Rainfall Threshold System for Landslide Triggering in Tuscany (Italy). *Journal of Geographical Sciences*, 22(4): 617–629. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0951-0>
- Wang, S. W., Sun, L. S., Rong, J., et al., 2014. Transit Traffic Analysis Zone Delineating Method Based on Thiessen Polygon. *Sustainability*, 6(4): 1821–1832. <https://doi.org/10.3390/su6041821>
- Wu, Y. P., Yin, K. L., Jiang, W., 2009. Early Warning of Landslide Risk in Yongjia County, Zhejiang Province. *Journal of Natural Disasters*, 18(2): 124–130 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889–895 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Xia, M. X., Li, Y. Y., Wu, J. M., et al., 2021. Research on Rainfall Early Warning Threshold of Landslide Disaster in Zhangjiajie City Based on I-D Statistical Model. *Journal of Natural Disasters*, 30(4): 203–212 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. H., Zhou, Z. C., 2014. Comparison of Ordinary Least Square Regression and Quantile Regression in the Study of Hydrological Elements of Yanhe River Basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 12(5): 45–51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. R., Yin, K. L., Liu, L. L., et al., 2005. Warning System for Rain-Induced Landslides Based on Internet in Zhejiang Province, China. *Earth Science*, 30(2): 250–254 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Wen, Z., Cheng, Y. J., 2020. A Discussion of the Relationship between Landslide Disaster and Rainfall Types in Bazhong of Sichuan. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(2): 178–182 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B. R., Dai, Q., Han, D. W., et al., 2019. Probabilistic Thresholds for Landslides Warning by Integrating Soil Moisture Conditions with Rainfall Thresholds. *Journal of Hydrology*, 574: 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.062>
- 中文参考文献**
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2016. 浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报. *地球科学*, 41(12): 2088–2099.
- 郭子正, 殷坤龙, 刘庆丽, 等, 2020. 基于位移比模型的三峡库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警. *地球科学*, 45(2): 672–684.
- 胡磊, 胡玉乾, 孙鹏, 等, 2021. 藏东南地区降雨型滑坡致灾阈值及滑坡危险性量化分析. *灾害学*, 36(4): 194–199.
- 黄发明, 曹中山, 姚池, 等, 2021. 基于决策树和有效降雨强度的滑坡危险性预警. *浙江大学学报(工学版)*, 55(3): 472–482.
- 黄发明, 陈佳武, 范宣梅, 等, 2022. 降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模. *地球科学*, 47(12): 4609–4628.
- 李长江, 麻士华, 李炜, 等, 2010. 滑坡频度-降雨量的分形关系. *中国地质灾害与防治学报*, 21(1): 87–93.
- 林巍, 李远耀, 徐勇, 等, 2020. 湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究. *长江科学院院报*, 37(2): 48–54.
- 罗渝, 何思明, 何尽川, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. *地球科学*, 39(9): 1357–1363.
- 彭启园, 2020. 甘肃滑坡与泥石流监测体系评价与数据分析研究(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 吴益平, 殷坤龙, 姜玮, 2009. 浙江省永嘉县滑坡灾害风险预警研究. *自然灾害学报*, 18(2): 124–130.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889–895.
- 夏梦想, 李远耀, 吴吉民, 等, 2021. 基于I-D统计模型的张家界市滑坡灾害降雨预警阈值研究. *自然灾害学报*, 30(4): 203–212.
- 杨丽红, 周正朝, 2014. 最小二乘与分位数回归方法在河流泥沙研究中的应用: 以陕北延河流域为例. *中国水土保持科学*, 12(5): 45–51.
- 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等, 2005. 基于WEB的浙江省降雨型滑坡预警预报系统. *地球科学*, 30(2): 250–254.
- 张勇, 温智, 程英建, 2020. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨. *水文地质工程地质*, 47(2): 178–182.