

## 极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算方法

谭畅, 周文超, 邓子昊, 吕庆, 于洋, 安妮

### Calculation of the return period for shallow landslides triggered by extreme rainfall

TAN Chang, ZHOU Wenchao, DENG Zihao, LYU Qing, YU Yang, and AN Ni

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

邓夕胜, 张元, 唐煜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 70-75

#### 四川巴中红层滑坡降雨阈值克里金插值法研究

Study on the rainfall threshold of red strata landslides in Bazhong, Sichuan using Kriging interpolation method

张群, 肖智林, 马志刚, 金圣杰, 李俊峰, 许钟元, 曾普, 张小琼 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(4): 36-44

#### 广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究

Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province

曾新雄, 刘佳, 赖波, 赵风顺, 江山 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 141-150

#### 基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定

Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province

宋昭富, 张勇, 余涛, 孙金辉, 韩新强, 陶昶旭 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 22-29

#### 甘肃省白龙江流域不同岩性滑坡降雨阈值研究

Study on rainfall threshold of different lithologic landslides in Bailong River Basin of Gansu Province

陈海龙, 宋晓玲, 张永军, 刘凯欢, 张黎, 刘明霞, 陈冠 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 40-46

#### 基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨

Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics

贾琰棋, 易武, 李华兵, 黄晓虎, 刘伟, 肖宇煌 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 30-38



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412028

谭畅, 周文超, 邓子昊, 等. 极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 72-77.

TAN Chang, ZHOU Wenchao, DENG Zihao, et al. Calculation of the return period for shallow landslides triggered by extreme rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 72-77.

## 极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算方法

谭畅<sup>1</sup>, 周文超<sup>2</sup>, 邓子昊<sup>1</sup>, 吕庆<sup>1</sup>, 于洋<sup>3</sup>, 安妮<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州 310058; 2. 浙江省地质院自然资源部, 浙江杭州 310007; 3. 浙江大学海洋学院, 浙江杭州 310058)

**摘要:**为了在长时间尺度下定量评估极端降雨诱发浅层滑坡灾害的动态危险性,为东南地区地质灾害风险防治工作提供参考,文章提出了一种考虑降雨不确定性的浅层滑坡重现期计算方法。具体计算框架为:(1)基于 Copula 函数构建极端降雨平均强度-持续时间( $I-D$ )联合分布;(2)基于地质条件与水文要素计算滑坡 $I-D$ 阈值;(3)采用蒙特卡罗法模拟极端降雨事件 $I-D$ 联合分布超过 $I-D$ 阈值的概率,作为单次降雨条件下的边坡失效概率 $P_{F1}$ ,进一步计算滑坡重现期。以浙江省马剑镇某滑坡隐患点为例验证该方法的可行性,得到其滑坡重现期的预测值为 17 a。建议采取相关防治措施以降低灾害可能造成的损失。

**关键词:**滑坡重现期; 极端降雨; Copula 函数;  $I-D$  阈值; 蒙特卡罗法

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)02-0072-06

## Calculation of the return period for shallow landslides triggered by extreme rainfall

TAN Chang<sup>1</sup>, ZHOU Wenchao<sup>2</sup>, DENG Zihao<sup>1</sup>, LYU Qing<sup>1</sup>, YU Yang<sup>3</sup>, AN Ni<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;  
2. Department of Natural Resources, Zhejiang Geological Institute, Hangzhou, Zhejiang 310007, China;  
3. College of Oceanography, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** To quantitatively assess the dynamic risk of rainfall-induced shallow landslides over extended periods and provide references for geological disaster risk prevention and mitigation in southeast China, this study proposes a method for calculating the return period of shallow landslides considering rainfall uncertainty. The specific calculation framework includes: (1) Constructing the joint distribution of extreme rainfall intensity-duration ( $I-D$ ) based on the Copula function; (2) Determining the  $I-D$  threshold for landslides based on geological conditions and hydrological factors; (3) Using the Monte Carlo method to simulate the probability that the joint  $I-D$  distribution of extreme rainfall events exceeds the  $I-D$  threshold, representing the probability of slope failure, and further calculating the landslide return period. The feasibility of this method was validated at a potential landslide site in Majian Town, Zhejiang Province. The predicted return period for the landslide is 17 years. It is recommended that relevant preventive and mitigation measures be implemented to reduce potential disaster losses.

**Keywords:** return period of landslide; extreme rainfall; Copula function;  $I-D$  threshold; Monte Carlo Method

收稿日期: 2024-12-17; 修订日期: 2025-03-18

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012601); 国家自然科学基金面上项目(42277132); 浙江省重点研发计划项目(2021C03159)

第一作者: 谭畅(2002—), 女, 博士研究生, 主要从事气候影响下极端降雨事件对浅层滑坡的影响预测研究。

E-mail: [tanchang02@zju.edu.cn](mailto:tanchang02@zju.edu.cn)

通讯作者: 吕庆(1978—), 男, 教授, 博导, 主要从事地质灾害风险防控理论与技术研究。E-mail: [lvqing@zju.edu.cn](mailto:lvqing@zju.edu.cn)

## 0 引言

降雨是滑坡灾害的重要诱因<sup>[1]</sup>。随着全球气候变化,极端降雨事件的频率与强度增大,群发性浅层滑坡的问题在我国东南地区越来越突出,已造成巨大的人员伤亡和经济损失。例如,2021年6月10日,诸暨市遭遇突发性极端降雨天气,诱发了701处滑坡,造成4人遇难,经济损失高达7.5亿元。极端降雨诱发浅层滑坡的危险性评估已成为我国东南丘陵区地质灾害防控领域亟待解决的难题之一。

针对降雨型滑坡的危险性评估问题,目前国内外学者大多选取具有代表性的特定极端降雨事件为工况,计算安全系数( $F_s$ )以评估斜坡稳定性<sup>[2]</sup>,该方法仅提供确定性的评估结果,未考虑降雨事件的随机过程特征。事实上,降雨强度、持续时间等降雨特征在时间分布上具有很强的不确定性,这种不确定性应被纳入滑坡危险性评估中。因此,有研究通过计算滑坡重现期以评估滑坡概率,此方法基于多年降雨数据,能够准确表征降雨特征的随机性。例如,Lu等<sup>[3]</sup>采用降雨强度与持续时间的二维联合分布模拟年降雨量的不确定性,结合斜坡地质条件计算边坡年失效概率;He等<sup>[4]</sup>提出了一种基于降雨事件交替随机更新过程的滑坡概率全寿命周期评价方法;Peres等<sup>[5]</sup>利用蒙特卡罗方法将随机降雨模型与斜坡水文模型结合,估算了滑坡重现期。这类基于随机降雨过程的滑坡重现期计算方法,能够实现长时间尺度下降雨诱发滑坡的危险性定量评估<sup>[6-9]</sup>。

本文在考虑降雨随机性的基础上重点刻画了极端降雨事件的特征,提出一种极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算方法:首先,对降雨数据进行统计分析,基于Copula函数构建极端降雨事件平均强度-持续时间( $I-D$ )的二元联合分布;其次,考虑土体力学性质与降雨输入,结合非饱和渗流与极限平衡分析,模拟单体斜坡失稳的 $I-D$ 阈值;最后,利用蒙特卡罗抽样方法模拟极端降雨事件 $I-D$ 联合分布超过滑坡 $I-D$ 阈值的概率,表征单次降雨导致特定斜坡失效的概率 $P_{F1}$ ,能进一步计算斜坡年失效概率 $P_{FA}$ 及滑坡重现期。该方法考虑了斜坡岩土体的特定力学性能以及降雨的不确定性,重现期计算结果能动态评估滑坡危险性,为风险处置以及地质灾害综合防治工作提供参考。

## 1 研究区概况

本文以浙江省诸暨市马剑镇某滑坡隐患点为展开研究。马剑镇位于诸暨市西侧,年平均降水量为1 801.36 mm。2021年6月10日诸暨市遭受极端降雨

天气期间,马剑镇发生86处地质灾害,占总历史灾害数量的92.47%,因此该地区极端降雨条件下的滑坡危险性评估工作亟待开展。

研究选取的滑坡隐患点如图1所示。该斜坡属于侵蚀剥蚀丘陵地貌,地形较陡,整体呈北西—南东向延伸。坡高差约125 m,坡度34°。坡面坡脚无地表水,降雨主要沿斜坡汇入坡底。根据工程勘探,该斜坡覆盖层主要为含碎石砂土、含碎石粉质黏土、全风化—强风化下白垩统流纹斑岩( $K_1\lambda\pi$ )。本研究选取a-a'剖面进行二维边坡稳定性分析,具体见2.2节。

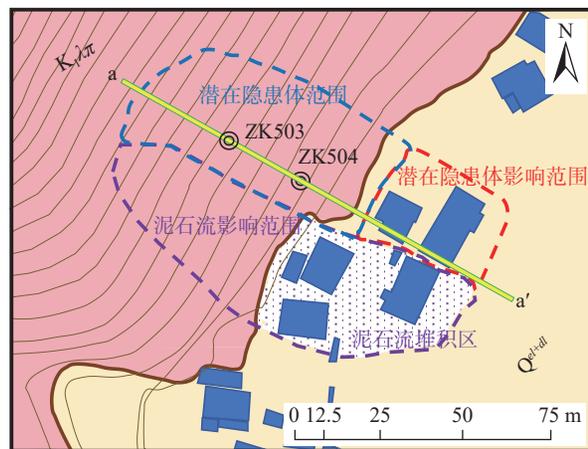


图1 研究斜坡示意图

Fig. 1 Profile map of the of the investigated slope

## 2 研究方法

文章提出了一个极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算框架,以浙江省马剑镇某隐患斜坡为例验证思路可行性。基于浙江省气象局提供的马剑站2005—2021年近17 a的小时降雨数据,考虑该斜坡的土体力学性质,计算能够表征斜坡动态危险性的滑坡重现期。具体框架如图2所示。

### 2.1 极端降雨事件 $I-D$ 联合分布

平均降雨强度( $I$ )和持续时间( $D$ )是反映极端降雨事件的最主要特征。为完整刻画极端降雨事件,本文考虑两者的统计相关性,采用Copula函数构建马剑镇极端降雨的 $I-D$ 联合分布模型。

#### 2.1.1 极端降雨事件提取

极端降雨事件的选择方法多样<sup>[10]</sup>,此研究基于以下规则从马剑站的小时降雨数据中提取降雨事件并进行极端降雨选择:①保证事件间间隔(IETD)大于等于6 h,且每场降雨事件的强度大于等于强度阈值 $I_0=1$  mm/h,提取每场降雨事件的持续时间( $D$ )与总雨量( $E$ ),并计算平均降雨强度 $I$ ;②利用峰值超过阈值法

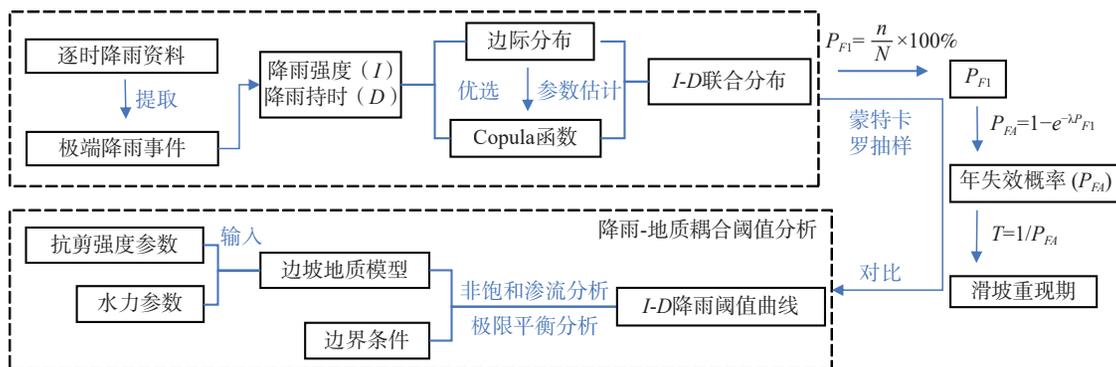


图 2 研究方法

Fig. 2 Research methodology

(POT)法进行极端降雨事件取样, 确保每年至少有一场降雨事件被纳入分析<sup>[11]</sup>,使用累计降雨量的 90% 分位数作为阈值, 确保数据拟合的准确性。

2.1.2 边际分布的构建

(1) 边际分布函数的优选

初选表 1 中的 5 个分布函数用于拟合  $I$  和  $D$ 。计算 5 种分布下  $I$  和  $D$  的赤池信息准则值(AIC)及  $K-S$  拟合优度指标, 优选分布函数。其中,  $AIC$  的计算公式如式(1):

$$AIC = -2\ln L + 2k \quad (1)$$

式中:  $k$ ——所拟合分布中参数的数量;

$L$ ——对数似然值。

表 1 马剑站边际分布拟合优度检验结果

Table 1 Results of the goodness-of-fit test for the marginal distribution of the Majian station

	降雨强度( $I$ )				
	Lognormal	GEV	GPD	Exponential	Gumbel
$AIC$	834.9	832.4	850.5	856.5	920.2
统计量( $D$ )	0.067 8	0.067 3	0.096 1	0.123 9	0.151 7
P-value	0.423 9	0.432 2	0.092 1	0.012 2	0.001 0
	降雨持续时间( $D$ )				
	Lognormal	GEV	GPD	Exponential	Gumbel
$AIC$	1 231.4	1 233.9	1 244.9	1 250.3	1 234.6
统计量( $D$ )	0.053 8	0.054 4	0.125 3	0.156 2	0.058 3
P-value	0.711 7	0.700 1	0.010 9	0.000 6	0.616 3

$AIC$  值越小及  $K-S$  检验中的  $D$  值越小且 P-value 越接近 1, 表明边际分布的拟合效果越好, 检验结果如表 1 所示。

分析表中结果, 优选 GEV 分布和 Lognormal 分布分别用于拟合  $I$  和  $D$  的边际分布。

(2) 基于 MCMC 方法的边际分布参数估计

常见的参数估计方法有矩量法、概率加权矩量法、 $I$  矩量法和最大似然估计, 然而, 这些方法仅给出了参数

的点点估计, 无法传达参数估计中持续存在的不确定性, 且在小样本的参数估计中准确性不高。贝叶斯推理提供了有力的框架来估计非平稳模型的后验分布, 并量化预测的不确定性, 是分析稀疏数据的首选方法之一<sup>[12]</sup>。在贝叶斯推理中, 马尔可夫链蒙特卡罗算法(MCMC)通常用于计算后验概率分布的矩和可信区间。本研究优选 MCMC 算法对边际分布参数的后验分布进行稳健估计。

在拟合  $I$  的 GEV 分布参数估计中, 3 个参数的先验均选用正态分布, 正态分布的均值设置为利用极大似然法计算的参数值, 方差设置为 2, 即:

$$\begin{cases} c \sim N(mle \text{ params } [c], 2) \\ \mu \sim N(mle \text{ params } [\mu], 2) \\ \sigma \sim N(mle \text{ params } [\sigma], 2) \end{cases}$$

在拟合  $D$  的 Lognormal 分布参数估计中, 参考 Kwon H 及 Sarhadi 等的研究<sup>[12-13]</sup>, 形状参数 ( $s$ ) 先验选用 Gamma 分布, 另外两个参数先验选用正态分布, 方差设置为 2, 即:

$$\begin{cases} s \sim Gamma(mle \text{ params } [s], 2) \\ loc \sim N(mle \text{ params } [loc], 2) \\ scale \sim N(mle \text{ params } [scale], 2) \end{cases}$$

式中:  $mle \text{ params}$ ——极大似然法计算的参数值。

边际分布的参数估计结果见表 2。

表 2 边际分布与 Copula 函数参数值  
Table 2 Marginal distribution and Copula function parameter values

	$I$ (GEV)	$D$ (Lognormal)	Copula函数单参数( $\theta$ )	
$c$	-0.52	$s$	0.54	
$\mu$	3.34	$loc$	-4.57	-7.890 3
$\sigma$	2.01	$scale$	19.32	

2.1.3 Copula 函数的构建

构建 Copula 函数之前, 采用 Kendall 秩相关和 Spearman 秩相关系数检验极端降雨事件样本中  $I$  与

$D$  的相关性, 结果显示两者间存在较强的负相关, 因此优选 Frank Copula 构建  $I$ - $D$  联合分布函数, 其分布见式(2):

$$C(u_1, u_2 | \theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{[\exp(-\theta u_1) - 1][\exp(-\theta u_2) - 1]}{[\exp(-\theta) - 1]} \right] \quad (2)$$

采用极大似然法进行参数估计, 计算得到 Frank Copula 的唯一参数  $\theta$  值为 -7.890 3, 边际分布与 Copula 函数的参数计算结果见表 2, Copula 的概率密度函数见图 3。

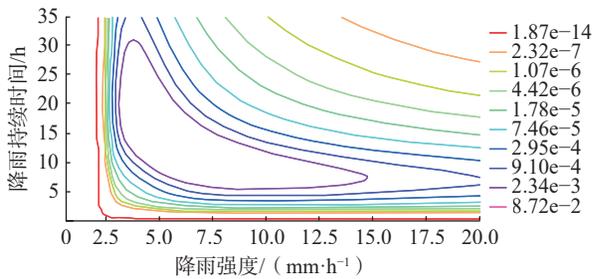


图 3 Copula 函数的概率密度函数 PDF 图  
Fig. 3 Probability density function of Copula function

由图 3 可得平均降雨强度  $I$  与持续时间  $D$  之间存在显著的负相关关系, 强降雨往往以短历时形式出现。同时, 随着  $I$  或  $D$  的增大, 即降雨事件特征趋于极端时, 联合概率密度逐渐减小, 对应的降雨事件发生概率显著降低。

### 2.1.4 $I$ - $D$ 联合分布的构建

结合边际分布与 Copula 函数框架, 能构建  $I$ - $D$  二元联合分布, 作为马剑镇极端降雨事件特征的概化模型, 如式(3)所示:

$$f_{ID}(I, D) = c(u_1, u_2) f_I(I) f_D(D) \quad (3)$$

式中:  $c(u_1, u_2)$ ——Copula 的概率密度函数;  
 $u_1 = F_I(I)$ —— $I$  的边际累计分布函数;  
 $u_2 = F_D(D)$ —— $D$  的边际累计分布函数;  
 $f_I(I)$ —— $I$  的边际概率密度函数;  
 $f_D(D)$ —— $D$  的边际概率密度函数。

### 2.2 滑坡 $I$ - $D$ 阈值的确定

参考工程地质勘察结果, 在 GeoStudio 中对研究斜坡的 a-a'剖面建模, 模型如图 4 所示。

在模型中输入斜坡土体参数。土体参数包括抗剪强度参数和水力参数, 通过试验获得。其中水力参数包括饱和渗透系数以及土水特征曲线。对于非饱和土体, 其基质吸力的大小是土体含水量的函数, 含水量和基质吸力的关系曲线称为土水特征曲线(SWCC)。土体的

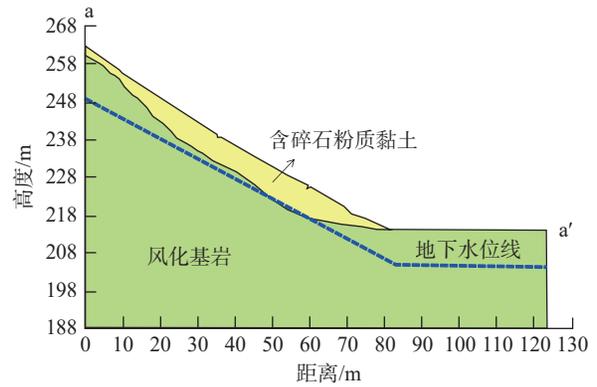


图 4 斜坡剖面模型

Fig. 4 Profile modeling of the investigated slope

渗透系数为饱和度或体积分水量的函数, 因此渗透系数也是基质吸力的函数。计算得到 SWCC 曲线及渗透系数函数如图 5 所示。

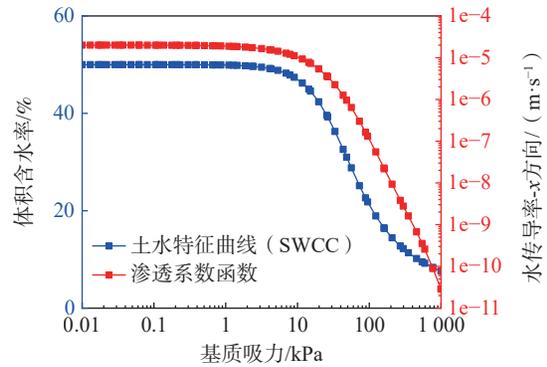


图 5 斜坡 SWCC 曲线及渗透系数函数

Fig. 5 SWCC curve and permeability coefficient function of the investigated slope

汇总表征斜坡岩土体水力和力学特性的参数, 如表 3 所示。为简化分析, 下覆风化基岩的饱和渗透系数取土体饱和渗透系数的 1/100, 即  $2 \times 10^{-7}$  m/s, 其余参数与表中土体参数相同。

表 3 斜坡土体参数表

Table 3 Soil parameters of the investigated slope

岩土体水力参数		岩土体抗剪强度参数	
饱和体积含水率/%	50	饱和重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	21
残余体积含水率/%	5	有效黏聚力/kPa	13
饱和渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )	$2 \times 10^{-5}$	有效内摩擦角/(°)	18

考虑平均降雨强度  $I$  为 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm/h 的均匀型降雨工况, 分别设置于入渗边界。采用基于 Richards 理论的二维非饱和渗流场模拟和 Morgenstern-Price 条分法计算斜坡的时变安全系数。记录安全系数到达指定阈值  $F_s=1$  所需的降雨持续时间  $D$ , 拟合 7 组

模拟结果,得到滑坡的  $I$ - $D$  阈值曲线如图 6 所示。

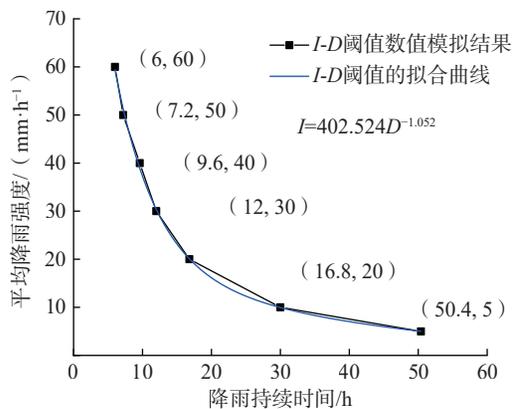


图 6  $I$ - $D$  降雨阈值曲线

Fig. 6  $I$ - $D$  rainfall threshold curve

### 2.3 滑坡重现期的计算

当降雨事件的平均雨强( $I$ )和持续时间( $D$ )联合坐标( $I, D$ )位于降雨阈值曲线的上方时,表明斜坡会发生失稳,其发生的概率等价于单次降雨导致斜坡失效的概率  $P_{F1}$ <sup>[14]</sup>,文章采用蒙特卡罗模拟方法计算  $P_{F1}$ ,根据  $I$ - $D$  二元联合概率密度函数式(3),随机生成  $N$  次降雨事件  $X_i = (i = 1, 2, \dots, k)$ ,其中每一个  $X_i$  包含一组  $(I_i, D_i)$  变量,与降雨阈值图 6 比对,若模拟中有  $n$  次降雨事件超出阈值,则  $P_{F1}$  可以表示为式(5):

$$P_{F1} = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

假设一年内多次降雨事件的发生是独立的,极端降雨事件的年发生次数遵循泊松分布<sup>[15]</sup>:

$$f_N(k) = P(N = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (5)$$

式中:  $P(N = k)$ ——一年内发生  $k$  次降雨事件的概率,  $k$  是非负整数;

$\lambda$ ——泊松分布的正参数,等于泊松分布的均值和方差。

泊松分布的  $\lambda$  可视作年平均极端降雨事件发生次数,本案例中  $\lambda$  的拟合结果为 9.56 次。

参考 Liu 等<sup>[3]</sup>的研究可知,年失效概率( $P_{FA}$ )与单次降雨失效概率( $P_{F1}$ )间的关系如式(6)所示:

$$P_{FA} = 1 - e^{-\lambda P_{F1}} \quad (6)$$

对应的滑坡重现期计算公式见式(7):

$$T = \frac{1}{P_{FA}} \quad (7)$$

计算出研究斜坡的年失效概率( $P_{FA}$ )为 5.85%,滑坡重现期为 17 a。

## 3 结果与讨论

### 3.1 案例斜坡滑坡危险性分析

#### (1) 地质条件与斜坡稳定性分析

本文选取的隐患斜坡整体剖面形态为凹形坡,可能导致降雨集中汇流,增加滑坡风险;钻探揭露基岩节理裂隙发育,岩芯较破碎,表明岩体强度较低,抗剪强度较差;切坡建房导致斜坡局部应力集中,增加了斜坡失稳的可能性,可能成为滑坡的潜在触发点。

#### (2) 极端降雨诱发滑坡的重现期分析

本文以滑坡重现期作为评估滑坡危险性的指标。滑坡重现期是指在特定区域内,某一特定强度或规模的滑坡事件发生的平均时间间隔。其估计结果并不意味着在重现期内斜坡必须保持稳定或在重现期之后斜坡就会失效,斜坡失稳在任何年份都可能发生。

通过本文提出的滑坡重现期计算框架,得到极端降雨诱发该斜坡滑坡的重现期为 17 a,意味着该斜坡在未来 17 a 内有较高的概率发生一次极端降雨诱发的滑坡事件。

#### (3) 滑坡危险性综合评价

案例斜坡坡脚有公路与居民区,屋前有便道连接村道,坡脚为公路,滑坡发生会对居民区造成直接威胁,引发一定程度上的人员伤亡、财产损失和环境破坏。根据重现期计算结果和地质条件分析,参考相关风险评价调查规范,该斜坡在极端降雨条件下具有中等滑坡风险。宜采取监测预警、工程治理等相关的防治措施以降低灾害可能造成的损失。

### 3.2 研究方法局限性

(1) 本研究基于历史小时降雨数据构建极端降雨事件  $I$ - $D$  联合分布。降雨数据长度为 17 a,不足以表征长时间尺度下降雨事件的非平稳特征。因此预测结果在未来的外推精度与适用时间范围有限,保守估计其仅适用于未来 20 a 以内的滑坡危险性评估工作。

(2) 斜坡土体力学性质理论上会随着降雨入渗而动态折减,但由于模型与计算的复杂性,本研究未考虑土壤力学参数的不确定性。

## 4 结论

(1) 重点考虑对极端降雨事件的定义与完整刻画,提出基于 Copula 函数构建平均降雨强度-持续时间( $I$ - $D$ )二元联合分布的方法,作为表征极端降雨事件特征的概化模型。

(2) 综合考虑斜坡岩土体力学特性与降雨条件,结合降雨输入与斜坡稳定性评价,提出了单个斜坡  $I$ - $D$  阈

值曲线的构建方法。

(3)基于获得的  $I-D$  联合分布函数与单个斜坡  $I-D$  阈值曲线,采用蒙特卡罗模拟方法,建立了滑坡重现期的动态估计框架。

(4)以浙江省诸暨市马剑镇某滑坡隐患点为例,验证了本文方法的可行性。计算得到该斜坡极端降雨条件下的失效概率为 0.63%、年失效概率为 5.85%、滑坡重现期为 17 a,上述结果可为降雨型滑坡的风险防控提供参考。

本文提出的极端降雨事件特征概化模型考虑了降雨过程的随机性,能反映一定时间尺度下当地的降雨特征。而全球气候变化导致极端降雨事件发生频率与强度呈现非平稳特征,如何量化气候变化对极端降雨的影响,实现更长时间尺度下的滑坡重现期评估,值得进一步探讨。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 周创兵,李典庆.暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展 [ J ] . *地球科学进展*, 2009, 24(5): 477 - 487. [ ZHOU Chuangbing, LI Dianqing. Advances in rainfall-induced landslides mechanism and risk mitigation [ J ] . *Advances in Earth Science*, 2009, 24(5): 477 - 487. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 王芳,殷坤龙,桂蕾,等.不同日降雨工况下万州区滑坡灾害危险性分析 [ J ] . *地质科技情报*, 2018, 37(1): 190 - 195. [ WANG Fang, YIN Kunlong, GUI Lei, et al. Landslide hazard analysis under different daily rainfall conditions in Wanzhou District [ J ] . *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(1): 190 - 195. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] LU Meng, ZHANG Jie, ZHENG Jianguo, et al. Assessing annual probability of rainfall-induced slope failure through a mechanics-based model [ J ] . *Acta Geotechnica*, 2022, 17(3): 949 - 964.
- [ 4 ] HE Zhengying, AKIYAMA M, ALHAMID A K, et al. Probabilistic life-cycle landslide assessment subjected to nonstationary rainfall based on alternating stochastic renewal process [ J ] . *Engineering Geology*, 2024, 338: 107543.
- [ 5 ] PERES D J, CANCELLIERE A. Estimating return period of landslide triggering by Monte Carlo simulation [ J ] . *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 256 - 271.
- [ 6 ] LIU Xin, WANG Yu. Analytical solutions for annual probability of slope failure induced by rainfall at a specific slope using bivariate distribution of rainfall intensity and duration [ J ] . *Engineering Geology*, 2023, 313: 106969.
- [ 7 ] LIU Xin, WANG Yu. Probabilistic hazard analysis of rainfall-induced landslides at a specific slope considering rainfall uncertainty and soil spatial variability [ J ] . *Computers and Geotechnics*, 2023, 162: 105706.
- [ 8 ] ZHANG J, ZHANG L M, TANG W H. Slope reliability analysis considering site-specific performance information [ J ] . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(3): 227 - 238.
- [ 9 ] LIU Xin, WANG Yu. Reliability analysis of an existing slope at a specific site considering rainfall triggering mechanism and its past performance records [ J ] . *Engineering Geology*, 2021, 288: 106144.
- [ 10 ] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望 [ J ] . *灾害学*, 2017, 32(2): 165 - 174. [ KONG Feng, SHI Peijun, FANG Jian, et al. Research progress and prospect of spatiotemporal pattern change of extreme precipitation and its influencing factors in the context of global change [ J ] . *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 165 - 174. ]
- [ 11 ] VINNARASI R, DHANYA C T. Bringing realism into a dynamic copula-based non-stationary intensity-duration model [ J ] . *Advances in Water Resources*, 2019, 130: 325 - 338.
- [ 12 ] KWON H H, LALL U. A copula-based nonstationary frequency analysis for the 2012-2015 drought in California [ J ] . *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5662 - 5675.
- [ 13 ] SARHADI A, BURN D H, AUSÍN M C, et al. Time-varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian copula [ J ] . *Water Resources Research*, 2016, 52(3): 2327 - 2349.
- [ 14 ] 雷德鑫,易武,柳青,等.三峡库区卧沙溪滑坡稳定性的可靠度及敏感性分析 [ J ] . *安全与环境工程*, 2018, 25(1): 23 - 28. [ LEI Dexin, YI Wu, LIU Qing, et al. Reliability and sensitivity analysis of woshaxi landslide stability in Three Gorges Reservoir area [ J ] . *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(1): 23 - 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] LU Meng, ZHENG Jianguo, ZHANG Jie, et al. On assessing the probability of rainfall-induced slope failure during a given exposure time [ J ] . *Acta Geotechnica*, 2023, 18(3): 1255 - 1267.