

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.16

三峡库区王家坡滑坡降雨阈值分析

雷德鑫^{1,2,3}, 易武^{1,2,3}

(1. 三峡大学湖北省长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省创新协同中心, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学湖北省防灾减灾重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 滑坡失稳破坏的诱因众多, 其中, 降雨是最常见和最活跃的诱发因素^[1]。为深入研究降雨对降雨型滑坡的控制作用, 分析诱发滑坡失稳变形的降雨阈值, 本文以三峡库区王家坡滑坡为例, 计算滑坡累积位移的类破坏点, 并选取三个不同观测时段, 分析不同观测时段下各个类破坏点的前期累积降雨量, 得出斜率阈值。研究结果表明: 随观测时段增大, 累积降雨量斜率先增大后减小, 且同一观测时段下, 累积降雨量斜率与时间间隔呈反相关关系。本文选取观测时段 $n = 10$, 时间间隔 $d = 1$, 计算各个类破坏点的降雨量斜率, 并通过加权平均得降雨量斜率阈值 $K = 10.95$ 。如果累积降雨量斜率大于斜率阈值, 则滑坡很有可能失稳破坏。

关键词: 降雨阈值; 类破坏点; 斜率阈值

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0095-07

Analysis of rainfall threshold of the Wangjiapo Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

LEI Dexin^{1,2,3}, YI Wu^{1,2,3}

(1. National Field Observation and Research Station of Landslide in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazard and Eco-Environment in Three Gorges Area of Hubei Province, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Numerous causes can lead to the failure of landslides, among which rainfall is the most common and active triggering factors. For further studying the effect of rainfall on a landslide and analyzing the rainfall threshold inducing the failure, in this paper the Wangjiapo Landslide in Three Gorges Reservoir Area was selected as an example. The class failure point of the accumulative displacement of this landslide is calculated, and three different observation periods are selected to analyze accumulated rainfall in early stage, and the slope threshold is obtained. The research results reveal that the slope of accumulated rainfall increase first and then decrease with the increase of observation period, meanwhile, in the same observation period, the slope of accumulated rainfall is negative with the time interval. Observation period $n = 10$ and time interval $d = 1$ are selected in this paper, calculating slope of accumulated rainfall of each similar failure point, and the $K = 10.95$ is obtained by weighted average. If the slope of accumulated rainfall is greater than the slope threshold, it is concluded that the landslide is likely to lose its stability.

收稿日期: 2017-12-01; 修订日期: 2018-01-13

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2017CFB436); 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室开放基金项目(2016KLA02); 湖北省防灾减灾重点实验室开放基金项目(2016KJZ16)

第一作者: 雷德鑫(1994-), 男, 地质资源与地质工程专业, 硕士研究生, 主要从事地质工程相关的工作。E-mail: 1652971850@qq.com

通讯作者: 易武(1966-), 男, 地质资源与地质工程专业, 博士, 教授, 主要从事边坡稳定性及其预测预报方面的研究。E-mail: 397745802@qq.com

Keywords: rainfall threshold; similar failure point; slope threshold

滑坡是我国主要的地质灾害类型之一,调查资料显示 90% 的滑坡由降雨诱发^[1-2]。降雨,特别是暴雨或者绵雨对滑坡的稳定性尤为不利,从发生时间上看,三峡库区的滑坡主要发生在每年 4~10 月的雨季,尤其是 6~8 月的暴雨季节,滑坡发生的概率以 7 月最大,占到 50% 以上。降雨对降雨型滑坡的控制作用主要通过雨水渗透,对滑带岩土体的软化作用,并增大容重,以及由此产生的动水压力和静水压力,使滑坡体抗剪强度降低,最终失稳破坏^[3]。滑坡的发生时间不仅与降雨历时、降雨量有关,同时还与降雨强度有关^[4-5]。由于降雨入渗、水文水力条件的复杂性、滑坡的非线性动力学特征等使得对降雨型滑坡的预测成为学术界的热点和难点。目前,对降雨型滑坡的预测预报主要有两种思路^[6-10],一种是基于传统的数学统计算法,统计一定区域内滑坡失稳滑动的事件案例,并通过现代专业监测手段提取滑坡发生滑动前的降雨历时、累积降雨量、降雨强度等信息,总结滑坡与降水之间的关系,从而获取诱发区域滑坡的经验性降雨模型。目前,国际上基于统计学建立的经验性滑坡降雨阈值模型大多采用 $I-D$ 曲线^[11], $I(\text{mm/h})$ 为降雨强度, $D(\text{h})$ 为有效降雨持续时间,并发展了多种不同的阈值统计关系,其中,降雨强度-历时关系阈值在世界各地降雨预报中使用频率最高^[12]。由于经验性降雨阈值不需要严格的数学推导和物理规律,是一种基于宏观滑坡区域和降雨数据的统计模型,且数据客观易得,因此经验性降雨阈值发展比较成熟。另一种是基于降雨入渗机理分析,构建边坡降雨入渗稳定性模型,通过模型试验或数值模拟等手段分析滑坡发生的内在破坏机理^[13-15],由于地下水渗流的复杂性,通常把模型试验和数值模拟相结合,寻求滑坡与降雨的关系,研究发现,降雨强度、降雨历时和雨型对暂态渗流场即边坡稳定性有显著影响。近年来基于逻辑回归统计方法运用到降雨诱发滑坡降雨阈值模型的推导以及滑坡敏感性区划中^[16-17],取得了不错的效果。

本文基于斜率阈值法^[18],分析滑坡累积位移的类破坏点,并选取三个不同观测时段,计算各个类破坏点的累积降雨与观测时段的线性回归系数,最后通过加权平均计算斜率阈值 K 。

1 斜率阈值法的基本原理

对降雨型滑坡,只有当降雨强度达到一定程度时,滑坡启动并最终失稳破坏,因此,根据降雨预测滑坡的关键

是确定滑坡的降雨阈值。本文依据斜率阈值法,分析滑坡累积位移与时间、降雨的关系曲线,分别求取滑坡累积位移的类破坏点、降雨量斜率、斜率阈值等对王家坡滑坡进行定量预报。该预报方法可以分为以下三个步骤:

(1) 分析滑坡的累积位移与时间、降雨量的关系,应用斜率单变点求取类破坏点;

(2) 对每个类破坏点的前期累计降雨量进行分析综合,得出斜率阈值;

(3) 根据实时降雨量求取降雨量斜率,并与斜率阈值进行比较,如果降雨量斜率大于斜率阈值,则滑坡很有可能失稳破坏。

1.1 类破坏点

大量的滑坡监测数据表明:在重力作用下,斜坡岩土体的变形演化曲线具有与岩土体蠕变曲线相似的演化特征,即包括初始变形阶段、等速变形阶段、加速变形阶段、临滑阶段,直至滑坡最终失稳破坏。对降雨型滑坡而言,当降雨达到一定强度时,滑坡变形急剧增大,由等速变形转为加速变形,期间有一个明显的拐点,此拐点称为类破坏点,本文主要通过斜率单变点求取类破坏点,斜率单变点求取步骤如下:

(1) 取定探索点。由于监测数据是等时间间隔的,若间隔不等,则用插值的方法预先处理数据,因此选取两个相邻观测时间点的中点为探索点,构成探索点序列 t_i 。

(2) 以各探索点为中心构造滑动窗口,以便计算出探索点前、后附近曲线的斜率,即探索点前、后若干数据点的线性回归系数。由于参加回归的数据点数 n 的大小会影响回归系数的取值,故在探索点前、后各取相同数量(n) 数据点构成滑动窗口,以便在相同条件下进行前、后斜率的对比。又由于曲线只有在较短的时间内才近似直线,故 n 取值不能太大。这里分别取 $n=2,3,4$ 构成 3 套滑动窗口。

(3) 在以 t_i 为滑动窗口中,对探索点 t_i 前(或左)的 n 个数据点做线性回归,求出回归系数,记为 $b_l^{(n)}(t_i)$,同样对探索点 t_i 后(或右)的 n 个数据点做线性回归,求出回归系数,记为 $b_r^{(n)}(t_i)$ 。显然 $n=2$ 时计算得到的回归系数反映局部的斜率性态较多,反映整体的斜率性态较少,又由于点数太少,随机性太强,统计意义不够;相反 $n=4$ 时计算得到的回归系数反映整体的斜率性态较多,反映局部的斜率性态较少,又由于点数较多,统计意义较强、随机性较小; $n=3$ 则介于两者之间。因此将 $n=2,3,4$ 时计算得到的 $b_l^{(n)}(t_i)$ 、 $b_r^{(n)}(t_i)$ 进行加权平

均,权取 n^2 。因此,对某个 t_i ,当 $b_j^{(2)}(t_i)$ 、 $b_j^{(3)}(t_j)$ 、 $b_j^{(4)}(t_j)$ ($j=l,r$) 均存在时,加权平均数为式(1):

$$\overline{b_j(t)}_i = \frac{1}{2^2 + 3^2 + 4^2} [2^2 b_j^{(2)}(t_i) + 3^2 b_j^{(3)}(t_i) + 4^2 b_j^{(4)}(t_i)]$$

(1)

(4) 对每个探索点 t_i ,计算 $\overline{b_r(t)}_i$ 与 $\overline{b_l(t)}_i$ 的一阶差分,记为 $\Delta S(t_i)$,即:

$$\Delta S(t_i) = \overline{b_r(t)}_i - \overline{b_l(t)}_i$$

(2)

(5) 对 $\Delta S(t_i)$ 序列,再计算其二阶差分 $\Delta S^2(t_i)$,即:

$$\Delta S^2(t_i) = \Delta S(t_i) - \Delta S(t_{i-1})$$

(3)

(6) 沿着 t_i 从小到大的序列,寻找序列中出现的最大值,设其所在的区间为 $[t_{i-1}, t_i]$,它就是斜率变点所在的区间,利用前后相邻的两个区间和及其对应的 $\Delta S^2(t_{i-1})$ 、 $\Delta S^2(t_{i+1})$,进行线性内插,即可求得斜率变点的精确值,计算公式如下:

$$t^* = t_{i-1} + \frac{\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i-1})}{[\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i-1})] + [\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i+1})]} \times (t_i - t_{i-1})$$

(4)

1.2 斜率阈值

应用斜率单变点求取类破坏点后,再将类破坏点前某一特定时间段 n 的降雨量累加得到累积降雨量 w ,并作出各个类破坏点的累积降雨 w 与观测时段 n 的关系图,得出每个点的线性回归系数 K_i ($i=1,2,\cdots,x$, x 为斜率单变点的个数),将 K_i 称为第 i 个类破坏点的降雨量斜率。将其中一个类破坏点的 K 值或几个类破坏点的 K 值得加权平均值定位累积降雨量斜率阈值,简称斜率阈值,即:

$$K = \frac{K_j}{\alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 + \cdots + \alpha_j K_j}$$

(5)

式中, $j \in (1, 2, \cdots, x)$, α_j 为 K_j 的权值。

2 王家坡滑坡概况

王家坡滑坡位于兴山县城古夫镇古夫河左岸,行政区划属湖北省兴山县古夫镇古洞村 1 组,滑坡坡体向西倾斜,坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$,分布高程 225 ~ 296 m,主滑方向 285° 。滑坡平面呈宽舌型,南北宽约 170 m,东西纵长约 190 m,面积 $3.23 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度 12 m,体积 $3.88 \times 10^5 \text{ m}^3$ (图 1)。

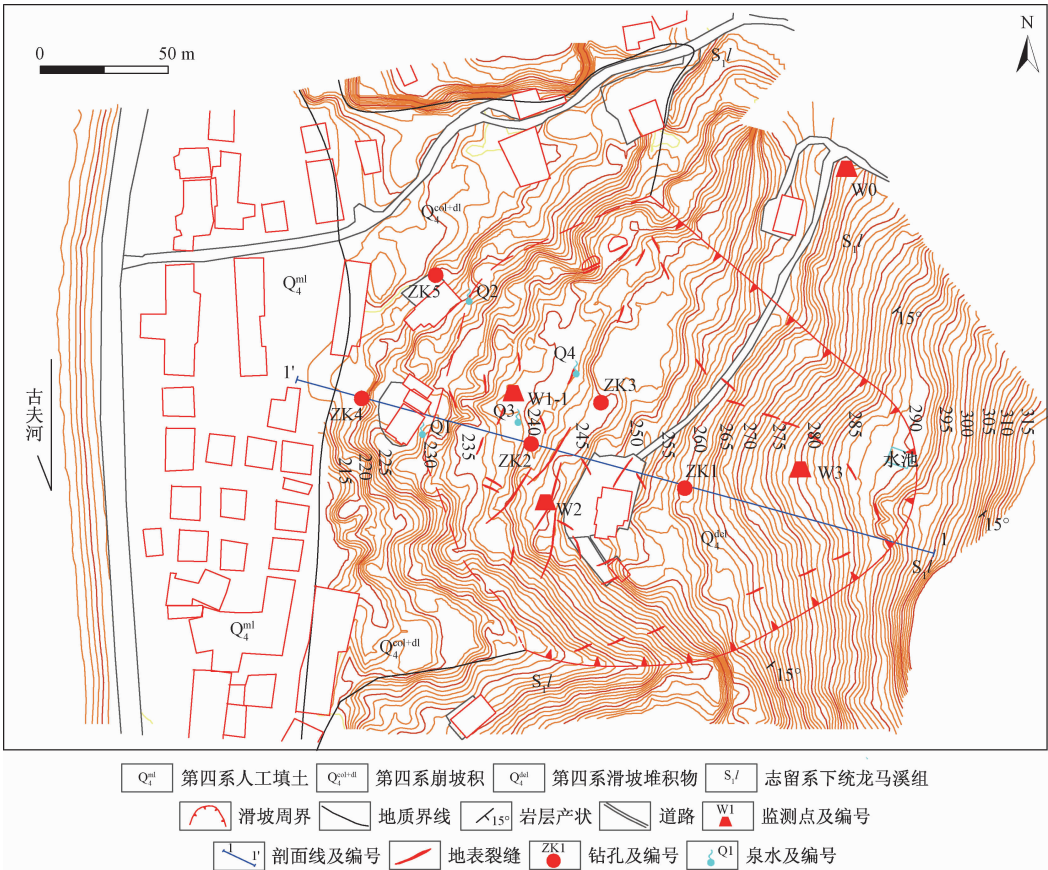


图 1 王家坡滑坡平面图

Fig. 1 Planar graph of the Wangjiapo Landslide

王家坡滑坡属于土质滑坡,根据滑体物质组成差异,从整体上看可以分为以下两个区域:250 m 高程至滑体后缘主要为碎石土,碎石含量较高,土石比 3:7 ~ 2:8,碎块石岩性主要为泥质页岩,棱角状-次棱角状,土主要为粉质黏土,硬塑-可塑。250 m 高程至滑坡

前缘:上层主要为粉质黏土夹少量碎石,下层主要为碎石土及冲洪积卵石层,碎块石含量相对较少,土石比 4:6 ~ 6:4。下覆基岩岩性为志留系下统龙马溪组 (S_1l) 薄层状泥页岩,岩层产状 $140^\circ \angle 15^\circ$,坡体结构为逆向坡(图 2)。

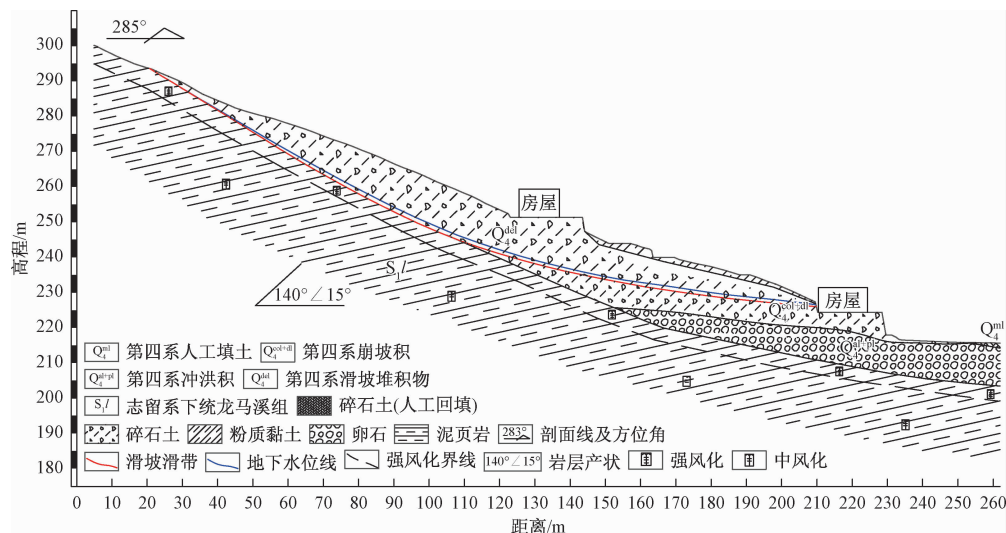


图 2 王家坡滑坡 1-1' 剖面图

Fig. 2 Sectional view of the Wangjiapo Landslide

目前主要由基准点 W0、监测点 W1-1、W2、W3 组成的自动监测网络实现对王家坡滑坡位移的实时观测,监测数据表明:自 2017 年 7 月 8 日实施专业监测以来,受降雨影响,王家坡滑坡一直处于缓慢变形阶段,且当降雨达到一定强度时,滑坡变形速率明显增大,而当降雨强度减小时,滑坡变形速率减小,甚至趋于平缓,因此王家坡滑坡属于典型的降雨型滑坡。本文以 W2 监测点累积位移为例,统计自 2017 年 7 月 8 日监测始,至 2017 年 12 月 21 日止,共计 167 期监测数据,分析累积位移与降雨量之间的关系(图 3)。

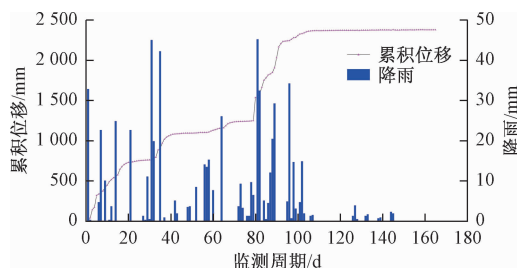


图 3 王家坡滑坡累积位移、降雨量关系图

Fig. 3 The relationship between accumulation displacement and rainfall for the Wangjiapo Landslide

3 求取类破坏点

受降雨影响,王家坡滑坡变形主要集中于前 110

期,且当降雨强度达到一定强度时,滑坡累积位移曲线发生明显的阶跃现象,因此本文选取前 110 期监测数据作为研究对象,并分析其类破坏点。由于王家坡滑坡的监测数据是等间隔的,因此选取相邻观测时间的中点为探索点,分别计算探索点前后的线性回归系数及加权平均数,并通过二阶差分确定斜率单变点所在的区间,最后通过线性内插求取斜率单变点的精确值。计算结果显示在 $t = 17, t = 37, t = 80, t = 91$ 处是斜率变点,即滑坡累积位移的类破坏点。

对每个类破坏点分别取观测时段 n 为 2, 4, 6... 14, 16, 并计算观测时段内的前期累积降雨量 w (图 4)。结果表明,当观测时段 $n \leq 10$ 时,各个类破坏点的前期累积降雨量随观测时段增大而急剧增大,当观测时段 $n > 10$ 时,各个类破坏点的前期累积降雨量增长速率明显放缓,即随时间增加,诱发滑坡的平均降雨强度在降低,总累积降雨量在增大。此外,通过计算各个类破坏点同一观测时段下的平均降雨量,并对不同观测时段下的平均降雨量进行线性拟合,如图 4 中直线所示,由图 4 可知,随着观测时段的生长,累积降雨量明显增大,并呈现一定的线性关系。

4 降雨量斜率阈值

通过分析统计各个类破坏点的前期降雨量,得出

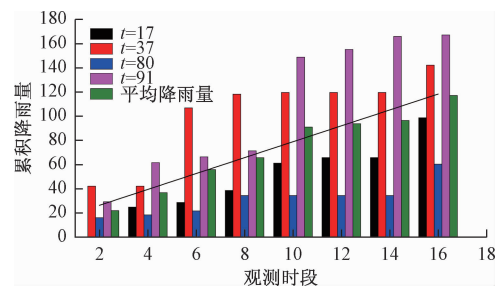


图 4 不同观测时段下各个类破坏点前期累积降雨量

Fig. 4 The accumulation rainfall of each similar failure point under different observation periods

王家坡滑坡的降雨量斜率阈值 K ,且研究表明:不同的观测时段和时间间隔对降雨量斜率阈值 K 的影响较大,因此需具体分析讨论不同观测时段和时间间隔条件下降雨量斜率阈值的变化。通过式(6)分析平均累积降雨量斜率:

$$K_a = \frac{\bar{w}}{n} \tag{6}$$

式中: K_a ——表示平均累积降雨量斜率;
 $\bar{w}$ ——平均累积降雨量;
 n ——观测时段,分析结果见表 1。

表 1 平均累积降雨量斜率随观测时段、时间间隔变化表

Table 1 The change of slope of average accumulated rainfall with observation period and time interval

d	K_a		
	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$
1	8.74	9.11	6.46
2	4.71	5.92	4.07
3	2.32	3.20	2.26
4	0.66	0.95	0.74

由表 1 可知,同一时间间隔下,随着观测时段 n 的增大,降雨量斜率 K_a 先增大后减小,同时,同一观测时段下,降雨量斜率 K_a 随时间间隔 d 的逐渐增大,整体上呈逐渐减小趋势。分析认为:随时间增加,对于降雨型滑坡,诱发滑坡的平均降雨强度降低,但总累积降雨量在增大,因此,平均累积降雨量斜率随时间增大而呈现先增大后减小的趋势,且前 10 d 累积降雨量越大,滑坡失稳概率越高,因此当 $n \leq 10$ 时,滑坡由等速变形进入加速变形阶段时,滑坡累积位移进入类破坏点所需的累积降雨量越大,即降雨量斜率越大;当观测时段继续增大时,在持续降雨作用下,雨水下渗,滑坡岩土体逐渐饱和,物理力学参数明显降低,使滑坡下滑力增大,并最终发生失稳滑动。综合以上分析,随降雨时间的持续增加,诱发滑坡失稳破坏的降雨因素主要为累积降雨量,降雨强度次之,因此,当观测时段持续增加

时,平均累积降雨量斜率逐渐减小。不同观测时段下降雨量斜率随时间变化如图 5 所示。

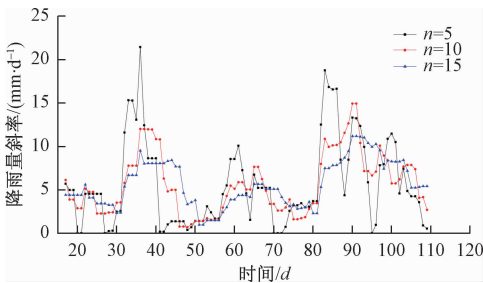


图 5 不同观测时段下王家坡滑坡降雨量斜率 ($d = 1$)

Fig. 5 The slope of rainfall under different observation periods ($d = 1$) for the Wangjiapo landslide

5 验证分析

上述研究表明,观测时段与时间间隔是影响降雨量斜率 K_a 的主要因素,当观测时段 $n \leq 5$ 时,此时各个类破坏点的线性回归系数反映局部的斜率性态较多,反映整体的斜率性态较少,又由于点数太少,随机性太强,统计意义不够;相反 $n \geq 15$ 时计算得到的回归系数反映整体的斜率性态较多,反映局部的斜率性态较少,又由于点数较多,统计意义较强、随机性较小; $n = 10$ 则介于两者之间。因此,本文选取 $n = 10, d = 1$,分别计算各个类破坏点的前期累计降雨量,将其线性回归计算各个类破坏点的降雨量斜率,通过加权平均得降雨量斜率阈值 $K = 10.95$ 。

通过对前 110 期监测数据进行验证分析,对剩余 57 期监测数据进行预测预报,并取斜率阈值 K 与降雨量斜率-时间关系曲线上升段的交点。如图 6 所示,在前 110 期监测数据中, $t_1 = 37$ (与实际相差 0 d), $t_2 = 83$ (与实际相差 3 d), $t_3 = 88$ (与实际相差 2 d),验证效果较好。且剩余 57 期降雨量斜率均接近于 0,远小于斜率阈值,表明此段时间降雨量远未达到滑坡临界降雨阈值,即滑坡处于稳定状态,累积位移几乎无变化,结合监测数据,预测效果较好。

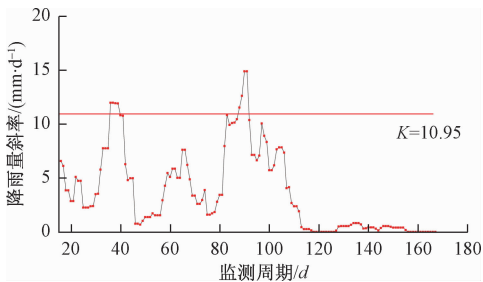


图 6 应用斜率阈值 K 预报图

Fig. 6 Application of slope threshold K for prediction

6 结论

本文基于斜率阈值法,求取滑坡累积位移的类破坏点,并对类破坏点的前期降雨量进行分析综合,求取斜率阈值,主要得到以下结论:

(1)平均累积降雨量斜率与时间间隔呈反相关关系,且随观测时段增大,平均累积降雨量斜率先增大后减小。

(2)王家坡滑坡降雨量斜率阈值 $K = 10.95$,当降雨量斜率大于斜率阈值时,滑坡很有可能失稳破坏。

参考文献:

- [1] 张珍,李世海,马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17):3185-3191.
ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing Area [J], Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3185-3191.
- [2] 伍宇明,兰恒星,高星,等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2):255-262.
WU Yuming, LAN Hengxing, GAO Xing, et al. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: a case study of Fujian Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 255-262.
- [3] 李焕强,孙红月,孙新民,等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4):589-594.
LI Huanqiang, SUN Hongyue, SUN Xinmin, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4):589-594.
- [4] 易武,孟召平,易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2011.
YI Wu, MENG Zhaoping, YI Qinglin. Theory and method of landslide stability prediction in the Three Gorges Reservoir Area [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [5] 唐红梅,魏来,唐云辉,等. 重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4):16-22.
TANG Hongmei, WEI Lai, TANG Yunhui, et al. Correlation analysis and prediction model for rainfall-induced landslide in Chongqing area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4):16-22.
- [6] 沈玲玲,刘连友,杨文涛,等. 基于 TRMM 降雨数据的四川省地质灾害降雨阈值分析[J]. 灾害学, 2015(2):220-227.
SHEN Lingling, LIU Lianyou, YANG Wentao, et al. Rainfall threshold analysis for the initiation of geological disasters in Sichuan Province based on Trmm Data [J]. Journal of Catastrophology, 2015(2):220-227.
- [7] 麻士华,李长江,孙乐玲,等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2):20-25.
MA Shihua, LI Changjiang, SUN Leling, et al. Rainfall intensity-duration thresholds for landslides in Zhejiang region, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2): 20-25.
- [8] 赵衡,宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(5):1481-1487.
ZHAO Heng, SONG Erxiang, Rainfall thresholds for regional landslides [J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(5):1481-1487.
- [9] 贺可强,郭栋,张朋,等. 降雨型滑坡垂直位移方向率及其位移监测预警判据研究[J]. 岩土力学, 2017(12):3649-3659.
HE Keqiang, GUO Dong, ZHANG Peng, et al. The vertical displacement direction rate of landslides induced by rainfall and its early warning destabilized criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017(12): 3649-3659.
- [10] 亓星,许强,孙亮,等. 降雨型黄土滑坡预警研究现状综述[J]. 地质科技情报, 2014(6):219-225.
QI Xing, XU Qiang, SUN Liang, et al. Research overview on early warning of precipitation-induced loess landslides [J]. Geological Science and Technology Information, 2014(6):219-225.
- [11] 戴丛蕊,黄玮,李蒙,等. 云南降雨型滑坡县级预警雨量阈值分析[J]. 气象科技, 2015, 43(4):675-680.
DAI Congrui, HUANG Wei, LI Meng, et al. Country-level rainfall warning thresholds for rainfall-induced landslides in Yunnan [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(4):675-680.
- [12] 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.
- [13] 杨攀, 杨军. 考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面[J]. 岩土力学, 2015(S1):169-174.
- YANG Pan, YANG Jun. Rainfall threshold surface for slope stability considering antecedent rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S1):169-174.
- [14] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1957-1962.
- XU Han, ZHU Yiwen, CAI Yuanqi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1957-1962.
- [15] 陈洪凯, 董平, 高阳华, 等. 重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(1):46-51.
- CHEN Hongkai, DONG Ping, GAO Yanghua, et al. Study on the statistics-infiltration coupling forecast model for rainfall-induced landslide in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(1):46-51
- [16] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3):32-37.
- TANG Hongmei, WEI Lai, GAO Yanghua, et al. A prediction model for rainfall-induced landslide based on logistic regression in Chongqing area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3):32-37.
- [17] 段功豪, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 基于动态指数平滑模型的降雨诱发型滑坡预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(7):958-962.
- DUAN Gonghao, NIU Ruiqing, ZHAO Yunnan, et al. Rainfall-induced landslide prediction based on dynamic exponential smoothing model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(7):958-962.
- [18] 陈志强, 王亮清, 刘顺昌. 基于斜率阈值法的滑坡预报分析[J]. 人民长江, 2010, 41(10):38-41.
- CHEN Zhiqiang, WANG Liangqing, LIU Shunchang. Improved sarma method and its application in analysis of stability of rock high slope excavation [J]. Yangtze River, 2010, 41(10):38-41.

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部