

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.005>



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

郭子正¹, 殷坤龙^{1*}, 刘庆丽², 黄发明³, 桂 蕾¹, 张桂荣⁴

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 重庆市万州区地质环境监测站, 重庆 404000

3. 南昌大学建筑工程学院, 江西南昌 330000

4. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024

摘要: 建立高效合理的区域滑坡灾害降雨预警模型对滑坡防治具有重要意义。然而以往的研究多侧重于临滑预警, 对蠕变型滑坡在强降雨工况下的短暂加速变形的预警研究还有待深入。以三峡库区云阳县域内滑坡为例, 首先根据滑坡地表位移监测数据的特点对统计样本进行合理筛选。再通过降雨因子与滑坡发生的相关性分析以及对滑坡在降雨条件下位移变化情况的数值模拟, 确定了适用于不同时间阶段的降雨统计变量。然后将考虑了滑坡规模特征的滑坡位移比(累计位移与滑坡纵长之比)作为变形指标, 分时段统计滑坡地表位移监测数据与历史降雨信息, 建立了日降雨数据与月位移数据的对应关系, 得到了可用于确定降雨量阈值的位移比模型, 并获得了云阳县蠕变型滑坡的五级预警分区。最后分别选用研究区滑坡险情实例、长年位移监测数据及极端降雨事件对模型预警效果进行检验。结果显示基于专业监测数据的位移比模型的滑坡降雨预警结果与实际情况相符, 可为蠕变型滑坡的预警预报提供依据。

关键词: 三峡库区; 蠕变型滑坡; 降雨预警; 专业监测; 位移比; 阈值; 工程地质。

中图分类号: P642.4

文章编号: 1000-2383(2020)02-672-13

收稿日期: 2019-01-30

Rainfall Warning of Creeping Landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir Region Based on Displacement Ratio Model

Guo Zizheng¹, Yin Kunlong^{1*}, Liu Qingli², Huang Faming³, Gui Lei¹, Zhang Guirong⁴

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Chongqing Wanzhou Institute of Geological Environment Monitoring, Chongqing 404000, China

3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330000, China

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China

Abstract: Establishing the efficient and reasonable regional landslide hazards rainfall warning model plays an important role in landslide prevention. However, more previous studies have been focused on the early warning before sliding rather than on the temporary accelerated deformation of creeping landslide after the heavy rainfall. Taking landslides in Yunyang County of the Three Gorges Reservoir region as an example, statistical samples were selected reasonably according to the characteristics of the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41572292, 41601563); 重庆市地质灾害防治中心项目“三峡工程重庆库区蓄降水诱发地质灾害成因分析与风险评估研究”。

作者简介: 郭子正 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事滑坡灾害预测预报和风险分析方面的研究。ORCID: 0000-0002-9847-2596. E-mail: cug-gzz@cug.edu.cn

* 通讯作者: 殷坤龙, ORCID: 0000-0002-3547-1633. E-mail: yinkl@126.com

引用格式: 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.

landslide surface displacement monitoring data firstly. Then the rainfall statistical variable applied to different time periods was determined by correlation analysis between rainfall index and landslide occurrence, and numerical simulation of displacement change of landslides in the rainfall condition. The displacement ratio (ratio of cumulative displacement and length of landslide) considering the scale characteristic of landslide was selected as the landslide deformation index and monitoring data of landslides and historical rainfall information in different time periods were counted. The relationship between daily rainfall data and monthly displacement data was built up. The displacement ratio model which can determine the rainfall thresholds was obtained, and five-level warning partition of creeping landslides in Yunyang County was determined. Finally, landslide instances, long-time displacement monitoring data and extreme rainfall event in research area were used to test the warning results of this model, respectively. The results show that the warning results of this model based on monitoring system data were the same as real conditions, and it could provide the basis for the early warning and prediction of the creeping landslides.

Key words: Three Gorges Reservoir region; creeping landslide; rainfall warning; monitoring system; displacement ratio; threshold; engineering geology.

0 引言

降雨是滑坡灾害的重要诱因(Xia *et al.*, 2013; 唐扬等, 2017), 如何对强降雨工况下的滑坡灾害进行预警, 一直是滑坡研究领域的热点问题(李聪等, 2016; 郭子正等, 2017). 选择合适的预警统计变量并正确分析滑坡变形特征与该变量间的关系, 从而建立准确的滑坡灾害降雨预警模型, 是预防滑坡灾害造成重大人员伤亡的有效手段(余斌等, 2016).

目前, 滑坡降雨预警的研究主要包括两种思路: 一是以降雨入渗机理为基础, 通过模型试验或数值模拟探讨降雨入渗条件下滑坡破坏的内在规律(Tsai *et al.*, 2006); 二是采用统计分析法, 基于大气降雨监测数据, 建立滑坡灾害时空分布与降雨过程的统计关系, 以达到预警目的(Guzzetti *et al.*, 2007; 赵衡等, 2011). 而由于降雨入渗诱发滑坡研究的复杂性, 后者仍是目前滑坡降雨预警研究的主要手段(唐红梅等, 2013). 如美国的 Campbell (1974), Wiczorek (1987) 等重点研究了滑坡启动的临界降雨强度与降雨持续时间的关系; Keefer *et al.* (1987) 利用该方法得到了美国旧金山地区的暴雨型滑坡预警模型; Guzzetti *et al.* (2007) 通过大量的统计数据建立了适用于全球的降雨 I (降雨强度, mm/h) - D (降雨持时, h) 曲线用以确定不同的降雨阈值. 而自从 2003 年全国地质灾害预报业务启动以来, 我国的相关研究工作也得以大量开展. 殷坤龙教授团队运用统计方法分析了区域地质—气象耦合关系, 并基于 Mapgis 平台开发了浙江省滑坡预警预报系统(谢剑明等, 2003; 张桂荣等, 2005); 许建聪等(2006) 对典型的松散土质滑坡位移和降雨量进行了回归分析和比较, 确定了两者相关关系一般

服从幂函数分布规律, 从而建立起两者的通用统计模型; 吴益平等(2014) 在全面分析区域历史滑坡资料的基础上, 根据有效降雨强度与关键降雨持续时间的散点图, 确定了恩施地区不同滑坡发生概率的有效降雨强度阈值; 唐红梅等(2013) 考虑了当日最大小时降雨这一因子, 利用逻辑回归法推导出重庆地区降雨型滑坡的预报模型.

综上所述, 目前利用统计分析法对降雨预警模型的研究, 主要集中在利用已发生的滑坡点降雨参数来获取临界降雨阈值或强度, 研究成果主要适用于滑坡临滑预警(黄雯等, 2014), 而对处于蠕变型滑坡的相关研究亟待加强. 虽然此类滑坡的滑速较慢, 但强降雨后的短暂加速变形仍会对滑坡体上居民的生命和财产安全造成严重威胁. 同时, 已有研究与降雨判据对应的统计变量多为滑坡发生个数或滑坡位移量, 并未考虑滑坡体本身的规模特征(何健保, 2016).

针对上述问题, 本文以三峡库区云阳县蠕变型滑坡为例, 利用其丰富的监测数据, 选择位移比作为滑坡变形指标, 对该指标与降雨因子的关系进行统计分析, 得到可以确定不同预警等级下滑坡降雨量阈值的位移比模型; 再结合当地监测体系及历史滑坡信息, 实现了蠕变型滑坡的分级预警, 从而直接为管理部门制定政策提供科学依据, 并为相关研究提供可行的思路.

1 研究区地质环境概况

1.1 研究区工程地质条件

研究区为三峡库区云阳县, 位于重庆市东北部, 长江上游, 总面积达 3 649 km². 四周分别与重庆

市万州区、开县、奉节县、巫溪县和湖北省利川市交界。云阳县地处四川盆地东部边缘,属丘陵向山地的过渡带,地形近似以东南西北为顶点的菱形,南北高,中部低,最高处海拔近2 000 m,最低处海拔仅20 m(图1)。

在地质构造上(图2),受到四川盆地的构造作用的影响,该区域褶皱发育较为密集,在平面上呈雁行式排列,形态为紧密背斜和宽阔向斜相间分布的“褶皱束”形态。典型的向斜构造包括渠马河向斜、故陵向斜、赶场向斜等,背斜构造包括方斗山背斜、铁峰山背斜等,由图2b可发现,在剖面上以隔档式褶皱为主。另据调查,研究区并无大型断裂构造,多为岩层接触面上的小规模断层。地层主要包括第四系、侏罗系及三叠系,其中,以侏罗系的砂岩、泥岩等分布最为广泛。

云阳县属于亚热带季风气候,气候偏湿润,多年平均降雨量为961.2 mm(1961年—2010年),且主要集中在雨季(5~9月份),各地降雨量具有明显

的空间差异性。境内地表水系发育,长江、数十条支流及小型溪沟构成了复杂的地表径流网络。区内地下水类型主要以松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙水为主,主要受大气降水补给。

1.2 研究区滑坡概况

正是由于上述复杂的工程地质条件,使得全区滑坡灾害十分严重,对人民生命和财产安全威胁巨大。据云阳县国土局资料显示,研究区内已查明滑坡灾害隐患点共971处(图1),占全县总地质灾害点的95%。其灾害总面积达到了90.9 km²,占全区总面积的约2.5%。滑坡总体积达8.3亿 m³,其中体积大于1 000万 m³的特大型滑坡11处,大型滑坡232处,两者共占滑坡总数的25%,可见数量多、体积大是云阳县滑坡发育的一大特征。按照滑坡物质组成不同,可将其划分为土质滑坡、岩质滑坡和混合式滑坡,其中的典型滑坡如云阳西城滑坡(土质滑坡)、旧县坪滑坡(岩质滑坡)、裂口山滑坡(混合式滑坡)等。

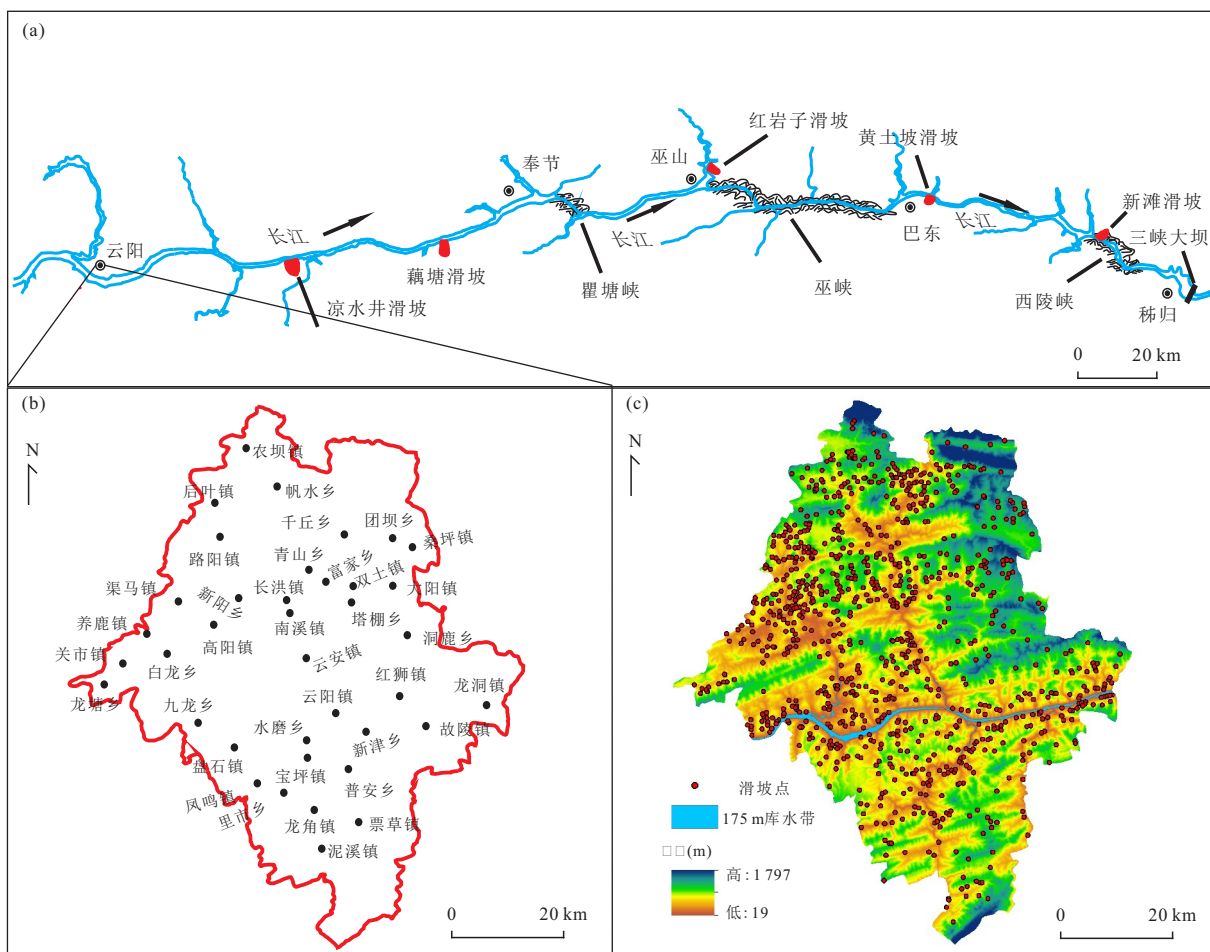


图1 云阳县地理位置及滑坡灾害分布

Fig.1 The location of Yunyang County and distribution of the landslides

2 蠕变型滑坡灾害降雨预警

2.1 滑坡专业监测概况

目前常见的滑坡监测预警主要有两种方式:专业监测和群测群防.专业监测是采用多种综合监测手段,对滑坡实施由地表到深部的全方位监测,包括地下水、GPS地表位移、深部位移、降雨量和滑坡推力监测等项目.其特点是精度高、自动化程度高、种类丰富,且能够提供多元监测数据,最大程度满足管理和研究需要(程温鸣,2014).据统计,目前三峡库区共有254处地质灾害专业监测点,有灾害隐患的崩塌、滑坡等基本都被纳入了该范围.其中,云阳县实施专业监测的滑坡为27个,部分滑坡从2003年开始进行监测,其余滑坡从2007年开始监测.

2.2 降雨预警模型的建立

2.2.1 位移监测数据样本的筛选 仅在自重作用下,滑坡位移-时间曲线会呈现出典型的“三阶段”特征(Miao *et al.*, 2017).但由于外界影响因素的扰动,该曲线最终会在理想位移曲线的基础上发生偏离.若滑坡受到非周期性因素(如人类活动)的影

响,则位移曲线会表现出波状起伏的振荡特性;而在周期性因素(水库正常的水位调度等)的作用下,位移曲线往往呈现阶跃型特征(许强等,2008);而如果滑坡较为稳定或由于监测过程中产生误差,则其累计位移量可能基本不变(图3).

在研究区现有的监测体系中,每个滑坡上都会布设多个GPS监测点,形称1~3条监测剖面.对比分析各滑坡的监测资料后发现,上述3种位移曲线均有出现.有时因偶然误差或滑坡变形的空间不均匀性,同一滑坡的不同GPS监测点也会出现不同类型的位移曲线.但是在滑坡降雨预警模型的研究中,更加注重降雨期间或降雨之后滑坡出现运动的情况,若将无明显加速变形的滑坡位移数据(平缓型曲线)纳入统计样本并无实际意义.因此,为排除处于稳定状态的滑坡的干扰及滑坡本身变形不均匀的影响,首先从每个滑坡中筛选出3~4组变形特征类似的GPS监测点数据组成统计样本,筛选的原则是:(1)近几年该GPS监测点的变形趋势较明显;(2)同一滑坡上所选的GPS监测点处在该滑坡的同一条监测剖面或者可组成一个强变形区.然后对各

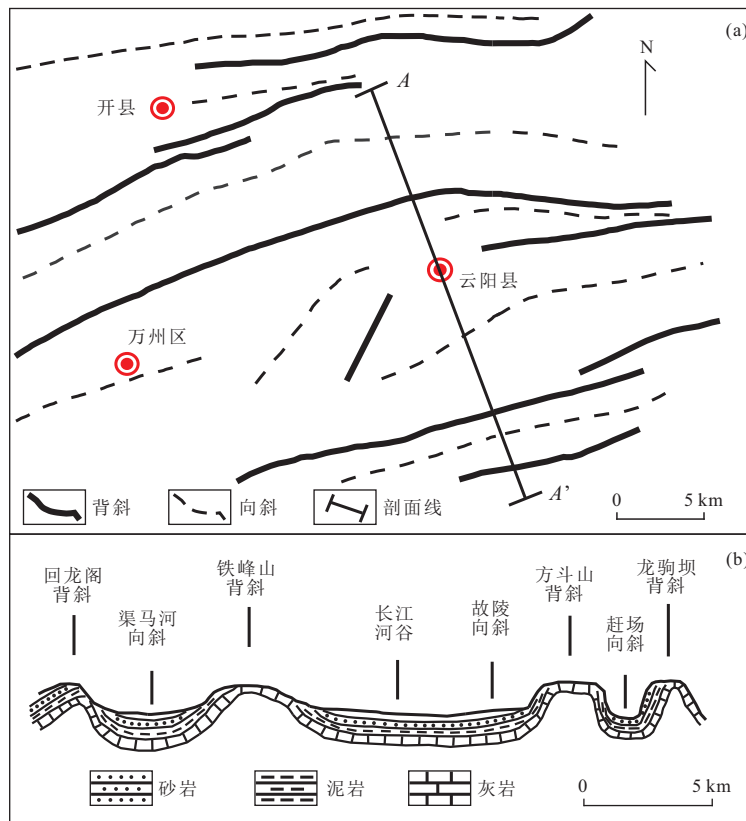


图2 研究区地质构造纲要图及典型剖面

Fig.2 The geological structure outline and typical profile of the study area

a. 研究区工程地质纲要图; b. A-A'剖面图

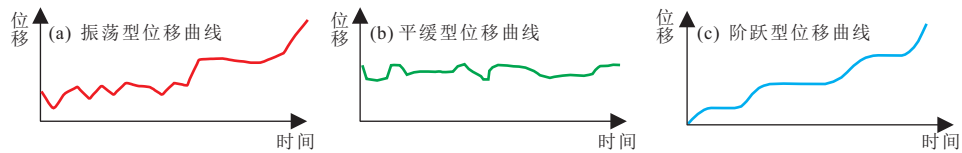


图3 不同类型的滑坡累积位移曲线

Fig.3 Different kinds of cumulative displacement curves of landslide

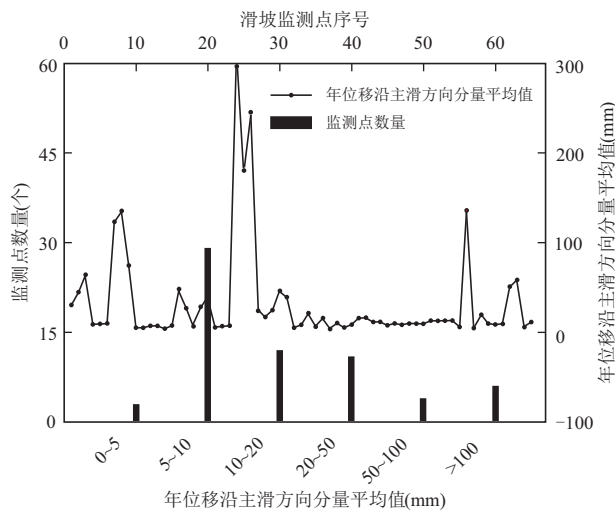


图4 滑坡监测点统计样本筛选结果

Fig.4 The statistical samples result of warning sites of landslides

监测点沿滑坡主滑方向的位移分量进行统计分析,考虑到GPS设备的系统误差等,将整个监测时段内沿主滑方向的平均年位移分量小于10 mm的监测点剔除.最终确定了全区33个GPS监测点共1758组监测数据作为最后的统计分析样本(图4).

2.2.2 降雨统计变量的确定 (1)研究时间段的划分

降雨和库水位变动是影响库区滑坡运动的重要因素(Miao *et al.*, 2017),只有将库水位变量进行合理控制才能单独研究降雨对于滑坡的影响.因此需要对时间段进行合理划分,使得同一时段内的库水位运行情况相同,再分别对每个时间段内的降雨情况进行统计分析.

三峡库区水位全年运行方式可分为5个阶段:1~4月(水位缓慢下降)、5月(水位快速下降)、6~8月(145 m水位)、9月(水位快速上升)、10~12月(水位缓慢上升).Li *et al.* (2009, 2018) 和 Xia *et al.* (2013)的研究表明,库水位的上升工况会产生指向坡体内部的动水压力,增大抗滑力,虽然水的浮托减重效应不利于滑坡的稳定,但是库区大部分滑坡在水位上升条件下的稳定性更好(李松林等, 2018);而库水位的下降对滑坡稳定性的影响机制则与此相反,该过程会产生坡体内外的水力梯度

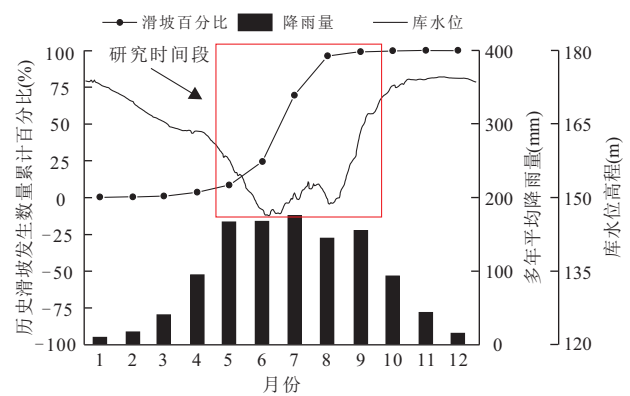


图5 重庆地区历史滑坡时间分布规律

Fig.5 The time distribution law of history landslides in Chongqing area

差,且由于坡体内部地下水向水库的排泄通常滞后于库水位的下降,该水力梯度差对于滑坡稳定性有不利影响.而且上述稳定性变化的敏感程度与水位的波动速度呈一定的正相关(郭子正等,2017).因此,如果考虑水位波动和降雨因素的联合作用,库水位上升叠加无降雨(或少雨)的工况(10~12月)对大部分滑坡的稳定性最为有利;同时,水位以较平稳的速度下降叠加少雨的工况对于滑坡的不利影响也是有限的.

综上所述,考虑到三峡水库在汛期的运行方式,最终确定了3个研究时段:5月、6~8月和9月.而研究区的历史滑坡资料显示,仅有11.5%的滑坡发生在每年的10月~次年的4月(赵鹏等,2017)(图5),说明水位缓慢下降期和缓慢上升期对滑坡稳定性的影响不显著,也验证了本文研究时段划分的合理性.

(2)降雨因子的确定

一般而言,滑坡往往发生在某个时段的极致降雨过程中,如最大单日降雨、多日累计降雨、最长一次连续降雨等(张桂荣等,2005).为了确定与滑坡关系最密切的降雨量因子,选取重庆地区汛期的历史降雨逐日数据,并统计同时段下该地区已有的滑坡信息,使用SPSS软件做相关性分析,求取不同降雨因子与滑坡发生的相关系数(图6).结果表明连续 n

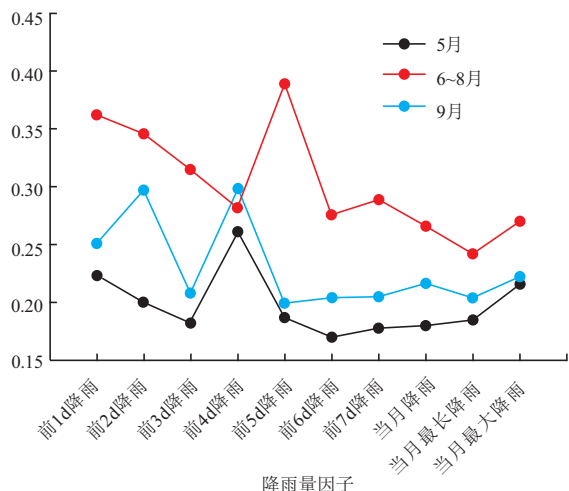


图 6 滑坡发生前 n 天降雨量因子与滑坡事件的相关性

Fig.6 The correlation relationship between rainfall index and landslide in n days before landslide

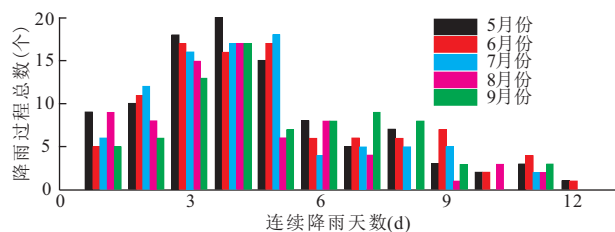


图 7 云阳县汛期各降雨过程持续时间的分布情况

Fig.7 The duration distribution of rainfall process in the rainy season in Yunyang County

日累计降雨量与滑坡的发生最为相关,但不同时段内的 n 值不同.在 5 月份,滑坡发生前 4 日的累计降雨量与滑坡的相关系数明显大于其它因子,因此 n 取 4;同理,6~8 月份时与滑坡相关性最大的降雨因子为前 5 日的累计降雨量,即 n 取 5;在 9 月份, $n=2$ 和 $n=4$ 时的相关系数最大,进一步统计汛期的降雨持续时间的分布情况后发现(图 7),在云阳县 9 月份的降雨过程中,连续 4 日累积降雨事件明显多于连续 2 日累积降雨事件.所以,为保证可获得的统计样本数量,9 月份的 n 取 4.

(3) 诱发滑坡运动的降雨量下限值

一般来说,一次降雨事件诱发的滑坡变形与降雨量呈正相关,但只有超过一定量的降雨过程才可能诱发滑坡开始运动(Chang *et al.*, 2009),若将全部降雨事件进行统计分析,会使统计效率降低.因此,需要确定诱发区域滑坡运动的降雨量下限值.首先选取了研究区中经过详勘的 22 个滑坡样本(全部为土质滑坡,具体信息见表 1),十余年的监测成

表 1 云阳县蠕变型滑坡信息统计表

Table 1 Statistics results of creeping landslides in Yunyang County

滑坡信息	具体信息	滑坡个数	统计参数		
			平均数	标准差	变异系数
最大位移量(mm)	0~800	18	188	179	0.95
	800~2 000	2	1 400	200	0.14
	2 000~5 000	2	4 150	450	0.11
坡体结构	顺向坡	19			
	逆向坡	3			
剖面形态	直线型	10			
	弧形	3			
	靠椅状	9			
坡高比	0~0.4	19	0.25	0.08	0.32
	0.4~0.8	3	0.54	0.16	0.30
内聚力(kPa)	10~30	12	25.6	3.7	0.14
	30~50	8	41.2	6.9	0.17
	50~100	2	58.0	2.0	0.03
内摩擦角(°)	10~20	9	17.6	2.3	0.13
	20~30	12	25.1	3.2	0.13
	>30	1	32.0		

表 2 云阳县蠕变型滑坡分时段降雨统计变量

Table 2 Rainfall indices in different periods of creeping landslides in Yunyang County

时间段	库水位运行方式	统计变量	
		降雨时间	累积降雨量
5 月	下降	连续 4 日累计降雨量	≥ 30 mm
6~8 月	低水位	连续 5 日累计降雨量	≥ 30 mm
9 月	上升	连续 4 日累计降雨量	≥ 30 mm

果显示绝大部分滑坡的位移量不足 800 mm,且全部滑坡均处于稳定(欠稳定)状态,未发生明显的加速变形迹象,因此可判断上述 22 处滑坡均处于蠕变阶段.从坡体结构和形态来看,这些滑坡绝大多数为顺向坡,剖面形态以直线型为主,坡高比集中在 0.25 左右,说明该类滑坡多呈狭长状,坡体表面较平缓,厚度小,易于降雨入渗.内聚力多在 20 kPa 左右,摩擦角多为 20°左右,说明滑坡能够提供的抗滑力较大.

根据上述统计结果,在 Geostudio 软件中建立滑坡的概化地质模型,利用其中的 sigma 模块进行降雨条件下的滑坡应力应变分析.以目前市场上常用的 GPS 设备的精度等级($\pm 1\sim 2$ mm)作为可监测到的滑坡位移变化值,首先对滑坡施加一个较小的降雨条件,观察滑坡位移情况,如果未发生至少 1~

表 3 滑坡变形特征指标对比

Table 3 Comparison of deformation characteristic indices of landslides

指标种类	考虑到的因素	数据来源	精度	不足
累计位移量	滑坡运动	实地测量或监测	较高	考虑因素较单一
位移速率	滑坡运动	监测数据或目测估算	较高(部分情况较低)	瞬时速率计算精度不高
切线角	滑坡运动、本构关系	滑坡位移-时间曲线	较高	定义不严密,数值不确定(许强等,2009)
位移比	滑坡运动、滑坡规模	监测数据、滑坡基本资料	较高	应用较少

2 mm 的位移,则继续增大降雨量,如此反复计算。最终的模拟结果显示,绝大部分滑坡在 30~50 mm 的降雨量条件下开始发生位移(仅有 2 处滑坡在小于 30 mm 的降雨量条件下开始位移),因此本文将诱发滑坡位移的降雨量下限值确定为 30 mm。

滑坡的降雨预警需要确定不同的降雨事件能够诱发的滑坡运动的程度,最基本的步骤就是确定多个降雨量阈值。利用数值模拟方法得到了降雨量下限值,就确定了预警等级的下限。然而,该方法难以应用于区域尺度上的滑坡预警(Martelloni *et al.*, 2012),因此,后续更危险预警等级下的降雨阈值计算需要依赖于统计分析模型,GPS 监测数据就成为了分析的基础。在该过程中,作为诱发滑坡运动的下限值,累积降雨小于 30 mm 的降雨事件我们不再进行统计,使得统计效率大大提高。

(4) 降雨统计变量

一次降雨事件通常包括降雨量、持续时间和强度 3 个参数,由于研究区降雨数据为逐日数据,无法获取较高精度的降雨强度,所以我们选取降雨量和降雨持续时间来识别研究区的降雨事件,并以此确定统计变量。综合上述 3 点,考虑到库区滑坡运动的影响因素、研究区降雨因子与滑坡发生的相关性以及滑坡位移对降雨的响应,最终确定的分时段降雨统计变量如表 2 所示。以 5 月份为例进行说明:如果任一连续 4 天的时间内总降雨量超过了 30 mm(不一定每天都有降雨,但只要是连续的 4 天时间),则该降雨量被纳入统计范围,否则会被剔除。该分析结果为后续的统计分析过程提供了基础,它可以对研究区的降雨事件进行筛选,将不符合统计变量要求的降雨事件剔除,使得降雨与滑坡变形的对应性更强。

2.2.3 滑坡变形指标的选择 以往的研究中,位移量、位移速率、位移加速度、切线角等都是常见的滑坡变形指标(许强等,2009;李聪等,2016),其中以位移类指标的应用最为频繁。然而,有研究(吴树仁等,2004)在综合分析了三峡库区典型滑坡剧烈变

形和突发快速滑动的现象后发现,累计位移量或位移速率的单一指标并不能适用普遍情况,还需考虑滑坡自身规模特征对位移大小的影响。

对于处于蠕变阶段的滑坡而言,蠕变位移量是其变形的主要组成部分,而蠕变位移量与岩土物理力学性质(c 、 φ 、 γ)、滑坡长度、滑体厚度均密切相关(何健保,2016)。因此,引入滑坡长度来代表滑坡规模(若是横长形的滑坡,则选择滑坡宽度),将滑坡累计位移与滑坡长度的比值(单位长度的位移量,即位移比)作为本研究的统计指标。与前人相关研究(表 3)对比后发现,位移比指标易获取且精度较高,满足降雨预警模型的需求。

2.2.4 位移指标与降雨统计变量的响应关系 由于专业监测体系的限制,研究中所获取的降雨量数据和位移数据经常会出现时间尺度上的差异,日降雨数据和月位移数据无法建立对应关系,给数据的处理带来了极大困难。因此如 3.2.2 小节所述,本研究确定了 30 mm 为研究区内诱发滑坡位移的临界降雨量。再根据相关研究(Tasi and Yang, 2006;许建聪等,2006),认为在同一库水位运行阶段,不同降雨过程所激发的位移量与该过程的降雨总量呈正相关,这样一来就将当月位移量分解成为了几个不同降雨过程期间的位移量,从而建立起了月位移量与日降雨数据间的对应关系。统计筛选出的 33 个 GPS 监测点在每个时间段中,降雨统计变量与滑坡位移比的响应关系,从而得到变形指标与连续 n 日降雨总量的散点图(图 8)。根据前人研究(戚国庆等,2004;许建聪等,2006),土质滑坡位移指标与降雨量一般呈非线性正相关,可用幂函数或指数函数对其进行拟合。因此,本研究不同时段下滑坡位移比与降雨量的函数关系最终可确定为:

$$\begin{cases} 5 \text{ 月份: } y = 0.056 \times 10^{-5} e^{0.058x} (R^2 = 0.27) \\ 6 \sim 8 \text{ 月份: } y = 0.197 \times 10^{-5} e^{0.025x} (R^2 = 0.27), \\ 9 \text{ 月份: } y = 0.181 \times 10^{-5} e^{0.020x} (R^2 = 0.36) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 表示累计降雨量; y 表示滑坡在该降雨条件下的位移比; R^2 为拟合曲线和散点间的拟合优度。

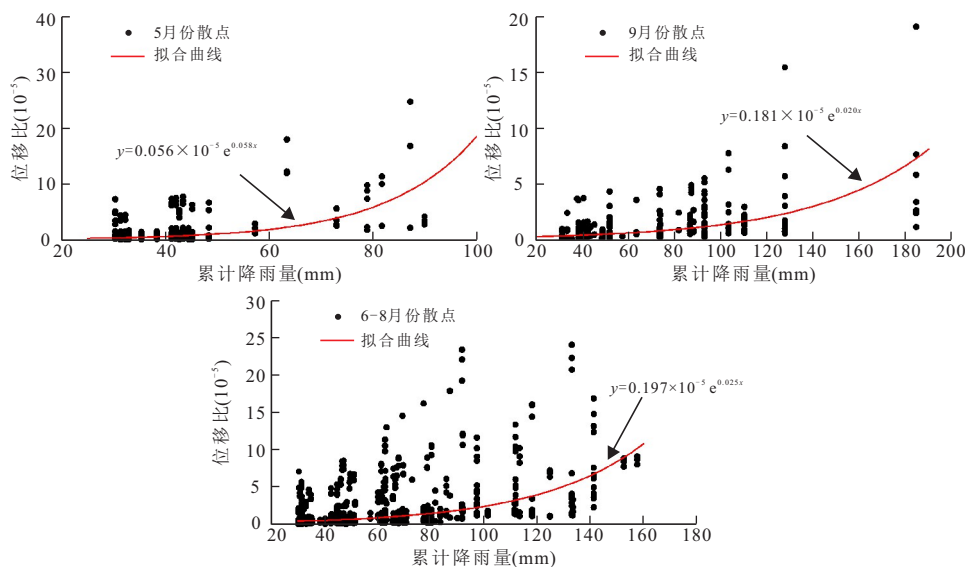


图 8 云阳县蠕变型滑坡位移比与降雨量关系图

Fig.8 The relationship between displacement ration and rainfall of creeping landslides in Yunyang County

表 4 典型滑坡在不同变形阶段的位移比

Table 4 The ratio of displacement and length of typical landslides in different deformation phases

滑坡名称	地点	缓慢变形阶段 位移(mm)	匀速变形阶段位移 (mm)	滑坡长度 (m)	缓慢阶段位移比	匀速阶段位移比
新滩滑坡	湖北秭归	<198	306~3 060	2 000	$<9.9 \times 10^{-5}$	$(15.3 \sim 153.0) \times 10^{-5}$
鸡鸣寺滑坡	湖北秭归	<39.6	114~380	250	$<15.8 \times 10^{-5}$	$(45.6 \sim 152.0) \times 10^{-5}$
黄茨滑坡	甘肃永靖		50~175	370		$(13.5 \sim 47.3) \times 10^{-5}$
曾家棚滑坡	重庆奉节	16~29	118~132	610	$(2.6 \sim 4.8) \times 10^{-5}$	$(19.3 \sim 21.6) \times 10^{-5}$
黄连树滑坡	重庆奉节	164~224	315~3 365	600	$(27.3 \sim 37.3) \times 10^{-5}$	$(52.5 \sim 560.8) \times 10^{-5}$

该结果表明,在不同的研究时段,拟合曲线与散点间呈现出弱相关—中等相关性.对于滑坡这样一个同时受诸多因素影响的复杂系统而言,单一的降雨因素能解释滑坡位移比指标 30%~40% 的变异性,说明降雨是诱发滑坡运动的重要因素,但不是唯一因素,符合研究区的实际情况.同时, Martelloni *et al.* (2012) 的研究表明,忽略滑坡发生中的复杂机制,直接利用统计模型的“黑箱性”获得降雨与滑坡间的经验公式,是解决区域尺度滑坡降雨阈值的重要手段.综上,式(1)的拟合精度符合研究需要,该式也可为确定区域滑坡降雨阈值提供基础.

2.2.5 降雨量阈值的确定 得到了降雨统计变量与位移指标的函数关系式,就可以通过位移比的特征值来确定对应的降雨量阈值.由于云阳县实施专业监测的滑坡点主要为堆积体滑动,故进一步收集近期发生的类似滑坡资料,统计其缓慢变形和等速变

形阶段位移情况,如图 9 和表 4 所示(李聪等,2016).归纳后可发现:当滑坡一段时间的位移比达 10×10^{-5} 时,可近似认为滑坡运动已短暂进入到缓慢变形期或者等速变形期,需要对滑坡进行预警.根据该值,通过式(1)找到对应的降雨量阈值分别为 89.4 mm、157.1 mm、200.6 mm.

由于研究区内的滑坡与统计样本的地质背景与自然环境一致,因此可将上述样本区的降雨量阈值结果推广到整个研究区.再结合该区域的监测体系及历史滑坡信息,最终得到云阳县蠕变型滑坡的标准化五级预警分区(表 5).根据前文所述的预警思路,针对某一具体的降雨事件,首先判断其发生时间段,确定 n 值(5月 $n=4$; 6~8月 $n=5$; 9月 $n=4$);然后计算该事件中连续 n 日累计降雨量的最大值;最后将该最大值与表 6 中的各降雨阈值对比,即可确定该事件所处的预警等级,并采取相应措施.

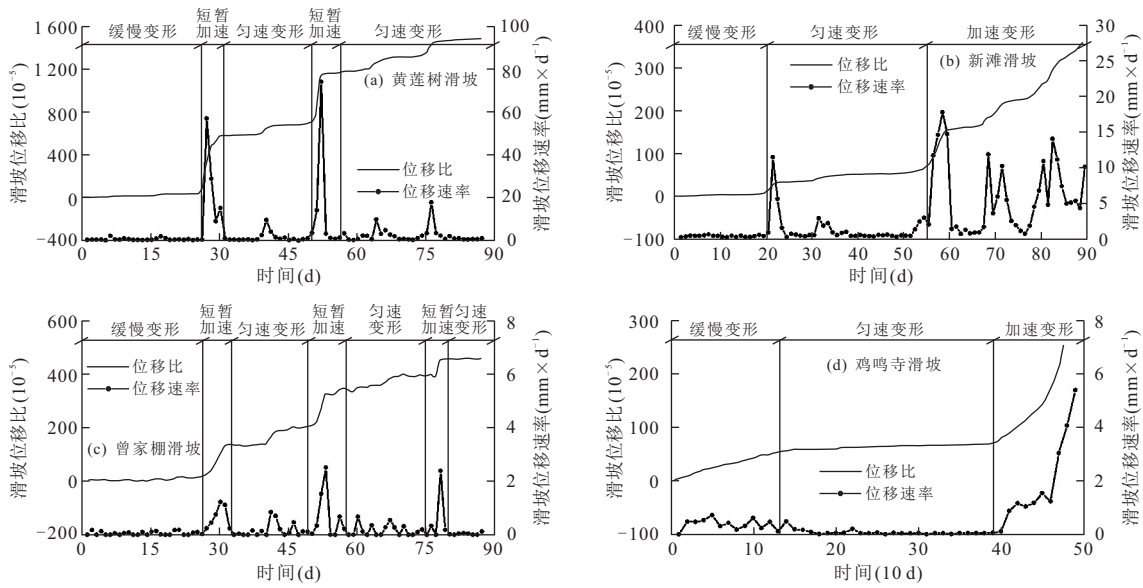


图 9 部分滑坡的位移比变化规律图

Fig.9 The laws of ratio of displacement and length of some landslides

表 5 云阳县蠕变型滑坡预警分区

Table 5 The warning levels of creeping landslide in Yunyang County

预警等级	所处变形阶段	灾害发生情况	防御措施(吴益平等,2014)	连续 n 日降雨量(mm)
1~2级	基本无变形或变形极小	可能性小	不采取措施或注意灾害点的监测情况	0~89.4
3级	缓慢变形	可能性中等	启动灾害隐患点的群测群防工作,提醒 灾害区内人员关注灾害动态	89.4~157.1
4级	等速变形或短暂加速变形	可能性较大	加强对灾害点的监测,对灾害 危险区开展预防应急措施	157.1~200.6
5级	加速变形至破坏	可能性极大	全天候对隐患点进行监测, 组织紧急疏散通道和救灾体系	>200.6

3 实例验证

对于建立的云阳县滑坡降雨预警模型,为了验证其可靠性,选取研究区 2016 年内的实时降雨数据、滑坡变形监测资料以及历史极端降雨事件分别进行滑坡的预警预报,将最终结果与实际情况相对比,检验该模型的预警能力.根据云阳县监测站资料显示,全区除个别滑坡已进入或即将进入临滑状态外,其余滑坡隐患点均处于蠕变期,因此可采用本研究模型进行降雨预警.

3.1 实时降雨数据预警

据统计,2016 年汛期,全区共发生较大规模($>10^5 \text{ m}^3$)滑坡险情 3 处:

(1)2016.6.3,龙洞镇发生一处滑坡险情,暴雨

之后斜坡发生短时间的缓慢位移,体积达到 $1.85 \times 10^6 \text{ m}^3$.由于该点已被纳入群测群防监测点,因此主管部门提醒当地居民密切关注滑坡的动态变化,最终滑坡位移停止,除少量房屋受损外,并无人员伤亡;

(2)2016.7.1,龙角镇一斜坡发生险情,体积为 $1.9 \times 10^5 \text{ m}^3$.由于不是原有的群测群防点,故地灾管理部门首先撤离了坡上居民 5 人,并在事故处理后在当地设立了新的群测群防点以监测滑坡的发展动态;

(3)2016.7.1,凤鸣镇发生滑坡险情,体积为 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$.该斜坡上并未有人居住,事后有关部门启动了该点的群测群防工作.

上述险情均发生于 6~8 月份的时段,因此 $n=$

表 6 2016 年云阳县滑坡险情统计信息

Table 6 The statistical information of Yunyang County landslides in the year of 2016

险情发生时间	地点	降雨		该等级下应采取的措施(据表 5)	实际处置情况
		变量值 (mm)	模型预警结果		
2016.6.3	龙洞镇	97.3	3级预警	启动灾害隐患点的群测群防工作,提醒灾害区内人员关注灾害动态	已设立群测群防点,提醒居民密切注意监测数据及宏观变形
2016.7.1	龙角镇	126.2	3级预警	同上	紧急撤离居民,事后启动了该点的群测群防工作
2016.7.1	凤鸣镇	139.3	3级预警	同上	启动了该点的群测群防工作

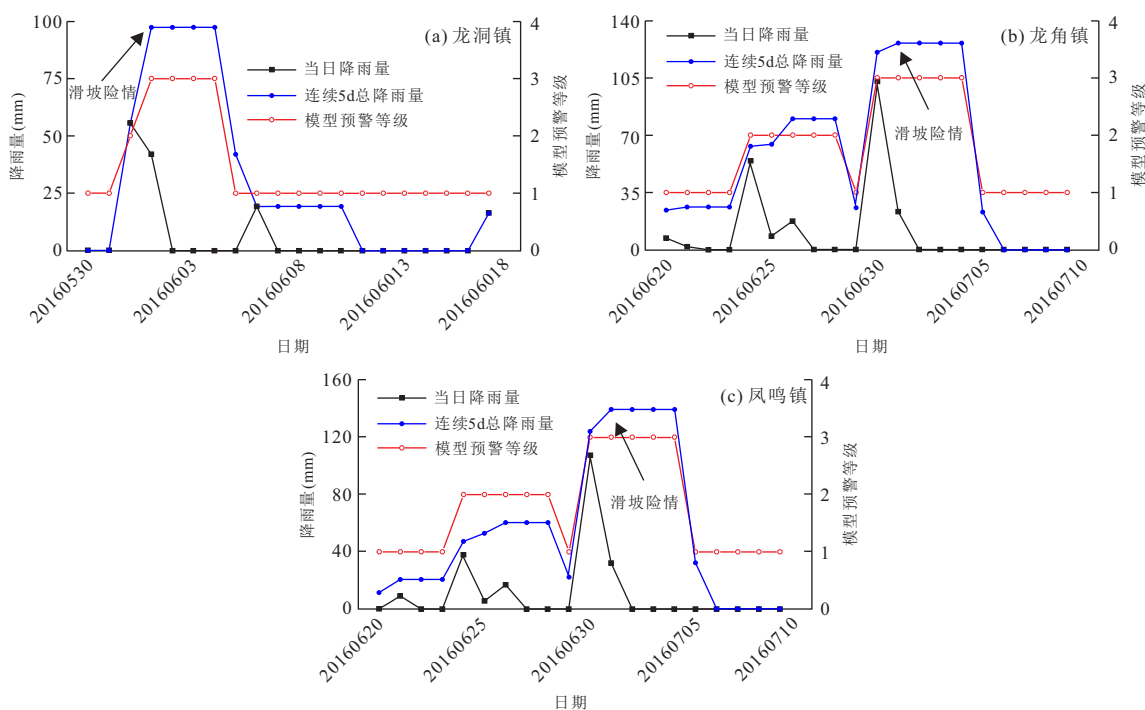


图 10 2016 年滑坡实例的模型预警结果和实际情况对比图

Fig.10 The comparison between model warning results and actual situations of landslide cases in 2016

5. 计算险情发生时的前 5 日累计降雨量变化情况, 结果如表 6 所示, 从中发现模型预测结果和实际所采取的应对措施相吻合; 进一步统计 3 处险情发生前后 20 天内的降雨统计变量值及其对应的模型预警等级, 结果如图 10 所示, 其中的“连续 5 日总降雨量”为当天之前 5 日的降雨量总和, 该值与表 5 中各降雨阈值对比后, 可以确定当日的预警等级, 即图中的红色预警线, 它能直观表达出当天滑坡所处的预警等级. 由该图可发现, 所有滑坡险情发生当日的预警等级均为该时间段内的最危险等级(红色预警线等于或高于其它时间), 且险情发生前后 1~3 日内的预警等级与其相比均有所减小, 表明该模型预警的及时性较好, 从而证明该模型切实可行, 预测结果较为精准.

3.2 变形监测资料数据预警

云阳县蠕变型滑坡拥有详实的监测资料, 其位移-时间曲线可以直观显示降雨条件下滑坡的运动特征, 也可作为滑坡预警的依据. 在研究区中选取 3 个不同滑坡上的 GPS 监测点, 它们都具有相似的“阶跃式”位移-时间曲线(图 11). 统计每个阶跃期对应的滑坡位移指标和降雨变量, 发现在每个位移陡增期间, 模型预警结果都至少为 3 级预警, 有的甚至达到了 4 级预警. 为了发现更普遍的规律, 利用全部 22 个滑坡的位移数据, 统计每个滑坡发生最大位移增量的“阶跃期”, 由图 12 可知, 每个“阶跃期”对应的预警等级均至少为 3 级(笔尖山滑坡除外,) 相应的位移比指标大都接近或超过了前文所述的 10×10^{-5} 这一特征值, 且该期间的位移值占监测点

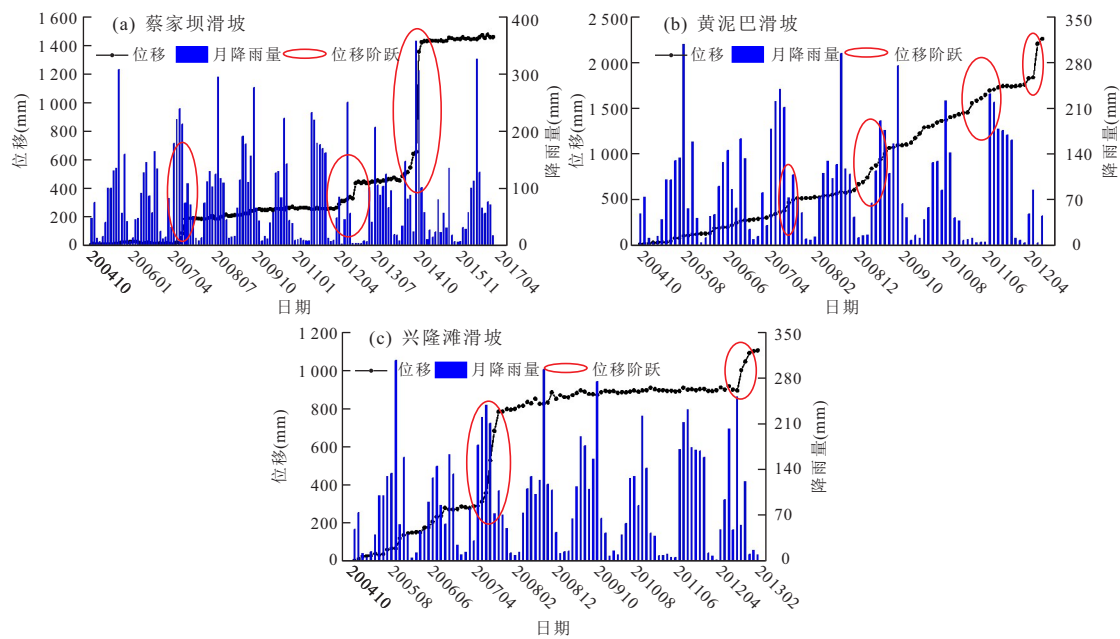


图 11 云阳县蠕变型滑坡的阶跃式位移曲线

Fig.11 The step-like displacement curve of creeping landslide in Yunyang County

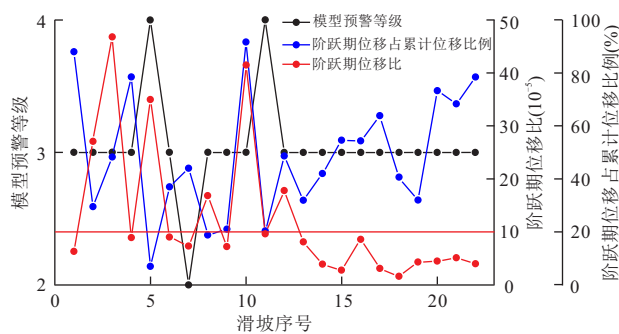


图 12 滑坡位移阶跃期的模型预警结果和实际情况对比

Fig. 12 The comparison between the model warning results and the actual situations

总位移的比值多数可达 20% 甚至 40%; 而相关单位的监测报告显示, 实际情况中滑坡位移的突然变化, 造成了不同程度的房屋损毁等经济损失, 并且采取了撤离相关人员、加强监测数据收集等相应措施减小滑坡风险. 滑坡 GPS 监测点的预警结果和实际情况保持一致, 表明了该模型的准确性.

3.3 历史极端降雨事件诱发滑坡

由于研究区降雨集中在汛期, 历史上曾发生多次极端降雨事件, 最近的一次为 2014.8.31 和 9.1 的特大暴雨事件, 该事件中 2014.8.30~2014.9.2 共 3 天内降雨量累计超过 300 mm. 根据本研究模型, 事件中前期累计降雨量大于 200.6 mm 的降雨阈值, 为预警模型中的 5 级预警, 需要对居民进行紧急撤离

来躲避滑坡风险. 而实际情况显示, 此次降雨过程在两天之内共造成各类滑坡灾情 394 处及险情 240 处, 产生了重大人员伤亡及经济损失, 这也验证了模型预警结果的准确性和可靠性.

4 结论

本文利用统计分析法, 提出基于滑坡专业监测的位移比模型, 用于三峡库区云阳县蠕变型滑坡的降雨预警. 该模型将考虑了滑坡规模特征的滑坡位移比作为变形指标, 克服了滑坡地表位移监测数据与降雨数据在时间尺度上的差异, 得到了蠕变型滑坡的 5 级预警分区, 确定了云阳县蠕变型滑坡的连续多日累积降雨量阈值. 采用研究区内 2016 年滑坡险情实例、专业监测点变形监测数据和历史极端降雨诱发滑坡事件分别进行验证, 发现模型预警结果与实际情况相符, 可为同类型滑坡的预警预报提供有力手段.

References

- Campbell, R. H., 1974. Debris Flows Originating from Soil Slips during Rainstorms in Southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 7(4):339–349. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1974.007.04.04>
- Chang, K. T., Chiang, S. H., 2009. An Integrated Model for Predicting Rainfall-Induced Landslides. *Geomorpholo-*

- gy, 105(3/4): 366—373. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.012>
- Cheng, W. M., 2014. Research of the Mechanism and Warning Criteria of Landslides Based on Monitoring System after Water Storage in the Three Gorges Reservoir(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Z., Yin, K. L., Tang, Yang., et al., 2017. Stability Evaluation and Prediction of Maliulin Landslide under Reservoir Water Level Decline and Rainfall. *Geological Science and Technology Information*, 36 (4): 260—265 (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(3/4): 239—267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Huang, W., Fang, Q., Wang, G. W., et al., 2014. Preliminary Study on the Critical Rainfall for Landslide Space Early Warning in Chaling County in Hunan Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 25 (3):38—42 (in Chinese with English abstract).
- He, J. B., 2016. Warning on Critical Displacement of Accumulation Landslide: A Case Study of Landslide in Lushan Earthquake Area(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., et al., 1987. Real-Time Landslide Warning during Heavy Rainfall. *Science*, 238(4829): 921—925. <https://doi.org/10.1126/science.238.4829.921>
- Li, C., Zhu, J. B., Wang, B., et al., 2016. Critical Deformation Velocity of Landslides in Different Deformation Phases. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(7):1407—1414 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Y., Yin, K. L., Leo, C., 2009. Analysis of Baishuihe Landslide Influenced by the Effects of Reservoir Water and Rainfall. *Environmental Earth Sciences*, 60(4): 677—687. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0206-2>
- Li, S. L., Xu, Q., Tang, M., G., et al., 2018. Study on Spatial Distribution and Key Influencing Factors of Landslides in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.576>
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., et al., 2012. Rainfall Thresholds for the Forecasting of Landslide Occurrence at Regional Scale. *Landslides*, 9(4): 485—495. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0308-2>
- Miao, F. S., Wu, Y. P., Xie, Y. H., et al., 2017. Prediction of Landslide Displacement with Step-Like Behavior Based on Multialgorithm Optimization and a Support Vector Regression Model. *Landslides*, 15(3): 475—488.
- Qi, G. Q., Huang, R. Q., 2004. Study on Slope Displacement due to Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 25(3): 379—382 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Wei, L., Gao, H. Y., et al., 2013. A Prediction Model for Rainfall-Induced Based on Logistic Regression in Chongqing Area. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 24 (3):32—37 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., Yin, K. L., Wang, Yang., et al., 2017. The Landslide Rain Infiltration Based on the Improved Mein-Larson Model. *Earth Science*, 42 (4): 634—640 (in Chinese with English abstract).
- Tsai, T. L., Yang, J. C., 2006. Modeling of Rainfall-Triggered Shallow Landslide. *Environmental Geology*, 50(4): 525—534. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0229-x>
- Wieczorek, G. F., 1987. Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains, California. *Reviews of Engineering*, 7(1):93—104. <https://doi.org/10.1130/reg7-p93>
- Wu, S. R., Jin, Y. M., Shi, J. S., et al., 2004. A Primary Study on Landslide Warning Criterion. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34 (4):596—600 (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).
- Xia, M., Ren, G. M., Ma, X. L., 2013. Deformation and Mechanism of Landslide Influenced by the Effects of Reservoir Water and Rainfall, Three Gorges, China. *Natural Hazards*, 68(2): 467—482. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0634-x>
- Xie, J. M., Liu, L. L., Yin, K. L., et al., 2003. Study on the Threshold of Rainfall of Landslide Hazards for Early Warning and Prediction in Zhejiang Province. *Geological Science and Technology Information*, 22 (4): 101—105 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. C., Shang, Y. Q., Wang, J. L., 2006. Study on Relationship between Slope-Mass Slide Displacement and Precipitation of Loose Soil Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25 (Supp1): 2854—2860 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Tang, M. G., Xu, K. X., et al., 2008. Research of Space-Time Evolution Laws and Early Warning-Prediction of Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics*

- and Engineering*, 27(6): 1104–1112 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zeng, Y. P., Qian, J. P., et al., 2009. Study on a Improved Tangential Angle and the Corresponding Landslide Pre-Warning Criteria. *Geological Bulletin of China*, 28 (4): 501–505 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Wang, T., Zhu, Y., 2016. Research on the Topographical and Rainfall Factors of Debris Flows Caused by Shallow Landslide. *Advances of Water Science*, 27 (4): 542–550 (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).
- Zhao, H., Song, E. X., 2011. Rainfall Thresholds of Regional Landslides. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41 (5): 1481–1487 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Yang, P. L., Jiang, L., et al., 2017. Situation of Geologic Hazards induced by Heavy Rainfall in North-east Chongqing. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34 (10): 50–56 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 程温鸣, 2014. 基于专业监测的三峡库区蓄水后滑坡变形机理与预警判据研究(硕士毕业论文). 武汉: 中国地质大学.
- 郭子正, 殷坤龙, 唐扬, 等, 2017. 库水位下降及降雨作用下麻柳林滑坡稳定性评价与预测. *地质科技情报*, 36(4): 260–265.
- 黄雯, 方琼, 王国卫, 等, 2014. 湖南茶陵滑坡空间预警的降雨临界值初步分析. *中国地质灾害与防治学报*, 25(3): 38–42.
- 何健保, 2016. 堆积层滑坡临界位移预警判据研究—以芦山灾区震后滑坡为例(硕士毕业论文). 成都: 成都理工大学.
- 李聪, 朱杰兵, 汪斌, 等, 2016. 滑坡不同变形阶段演化规律和变形速率预警判据研究. *岩石力学与工程学报*, 35(7): 1407–1414.
- 李松林, 许强, 汤明高, 等, 2018. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子. *地球科学*. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.576>
- 戚国庆, 黄润秋, 2004. 降雨引起的边坡位移研究. *岩土力学*, 25(3): 379–382.
- 唐红梅, 魏来, 高华阳, 等, 2013. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型. *中国地质灾害与防治学报*, 24(3): 32–37.
- 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等, 2017. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型. *地球科学*, 42(4): 634–640.
- 吴树仁, 金逸民, 石菊松, 等, 2004. 滑坡预警判据初步研究—以三峡库区为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(4): 596–600.
- 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.
- 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等, 2003. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究. *地质科技情报*, 22(4): 101–105.
- 许建聪, 尚岳全, 王建林, 2006. 松散土质滑坡位移与降雨量的相关性研究. *岩石力学与工程学报*, 25(增1): 2854–2860.
- 许强, 汤明高, 徐开祥, 等, 2008. 滑坡时空演化规律及预警预报研究. *岩石力学与工程学报*, 27(6): 1104–1112.
- 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等, 2009. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据. *地质通报*, 28(4): 501–505.
- 余斌, 王涛, 朱渊, 2016. 浅层滑坡诱发沟谷泥石流的地形和降雨条件. *水科学进展*, 27(4): 542–550.
- 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.
- 赵衡, 宋二祥, 2011. 诱发区域性滑坡的降雨阈值. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1481–1487.
- 赵鹏, 杨沛霖, 蒋莉, 等, 2017. 渝东北地区强降雨诱发地质灾害险情分析. *长江科学院院报*, 34(10): 50–56.