

doi:10.3799/dqkx.2014.083

基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警

吴益平¹, 张秋霞¹, 唐辉明^{1*}, 肖威²

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 西北核技术研究所, 陕西西安 710024

摘要: 选取湖北省恩施地区 1 000 km² 区域作为典型研究区, 在全面分析该区域历史滑坡资料的基础上, 根据该区滑坡生成与地层岩性之间的关系, 将研究区地层划分为高、中、低 3 类易发性岩组。分岩组统计降雨监测数据与历史滑坡信息, 得出有效降雨强度与关键降雨持续时间的散点图, 由此确定不同滑坡发生概率的有效降雨强度阈值, 提出该区的滑坡灾害危险性预警判别模型。基于样本区统计数据建立滑坡预测指标体系, 运用 GIS 得出研究区域的滑坡空间易发性区划结果, 并根据不同易发岩组—有效降雨强度模型, 叠加滑坡灾害易发性分区结果与降雨危险性预警等级分级结果, 对研究区的滑坡灾害危险性进行了预测预警。结果表明: 不同易发岩组—有效降雨强度模型所得预警结果与实际情况吻合, 预警模型具有考虑全面和预警精度高的特点, 在实际预警中切实可用。

关键词: 滑坡; 易发岩组; 有效降雨强度; 危险性预警。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2014)07-0889-07

收稿日期: 2013-12-30

Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity

Wu Yiping¹, Zhang Qiuxia¹, Tang Huiming^{1*}, Xiao Wei²

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

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract: A region of 1 000 km² in Enshi, Hubei Province is chosen as the typical study area, and its historical landslide data are comprehensively analyzed in this paper. The strata in the study area are divided into three types including high, middle and low susceptible petrofabrics according to the relationship between local landslide formation and lithology. The scatter diagrams about effective rainfall intensity and critical duration are obtained based on rainfall monitoring data and historical information of landslides in each petrofabric. Thus effective rainfall intensity thresholds are determined and landslide hazard warning model of the study area is suggested. In this study, landslide prediction evaluating system is firstly established based on data of sample area, and then landslide susceptibility distribution map is obtained by using GIS. According to Different Susceptible Petrofabric-Effective Rainfall Intensity Models, the landslide hazard warning is realized by overlaying landslide susceptibility distribution map and rainfall risk grade distribution results. Results show that the hazard warning results fit well with the actual situation. Thus, the warning model is verified to be effective, accurate and comprehensive to provide scientific evidence for preventing and reducing disasters.

Key words: landslide; susceptible petrofabric; effective rainfall intensity; hazard warning.

由降雨因子诱发的滑坡称为降雨型滑坡。大量统计资料表明, 多数滑坡发生于降雨期间或降雨之后, 且一个地区的滑坡发育程度有随降雨量增多而增强的规律。美国 (Campbell, 1974; Cannon and Ellen, 1985; Wiczoic, 1987) 是世界上开展滑坡灾害预

警最早的国家, 在理论上主要致力于研究滑坡启动的临界降雨强度与降雨持续时间的关系, 由于不同的滑坡区对气候的敏感性程度不同, 因此, 研究人员分别采用 Cannon-Elleon 模型和 Wiczoic 模型来确定旧金山湾地区一般敏感滑坡区和非常敏感滑坡区

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2011CB710606); 国家自然科学基金 (No. 41272307)。

作者简介: 吴益平 (1971-), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及工程地质相关的教学及科研工作。E-mail: ypwu@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 唐辉明, E-mail: hmtang6205@sina.com

的滑坡启动临界降雨判据.此外,香港(Brand *et al.*, 1984)、日本(Fukuzono, 1990; Takara *et al.*, 2010)、新西兰(Glade, 1997; Schmidt *et al.*, 2008)、意大利(Aleotti, 2004; Martelloni *et al.*, 2011)、挪威(Dieu *et al.*, 2013)等多个国家和地区已开展了面向公众的区域性滑坡实时预报,预报精度以小时衡量.降雨、涌浪等与水相关的因子是诱发滑坡的重要因素(殷坤龙, 2012).2003年6月1日,我国国土资源部与中国气象局启动了降雨型突发地质灾害的预警预报工作,开创了我国区域降雨型滑坡预报预警的先河,采用的方法主要为:地貌分析—临界降雨量模型判据法、气象—地质环境要素叠加统计法、地质灾害致灾因素的概率量化模型、地质灾害预报指数法、降雨量等级指数法、区域地质—气象信息的耦合模型等(李媛, 2005; 乔建平等, 2009 盛晓杰, 2011).Pietro(2004)对意大利西北部 Piedmont Region 地区频繁发生的浅层滑坡做了分析,着重考虑降雨因子,提出了适用于降雨持续较长时间的临界降雨模型,并得出预报降雨诱发滑坡的临界降雨参数曲线.殷坤龙和张桂荣(2003)、张桂荣和殷坤龙(2005)在国内开展了基于 WebGIS 的地质灾害实时预警预报研究,综合考虑气象—地质耦合因素,用统计分析的方法寻求降雨与滑坡相关性规律,探讨台风区和非台风区滑坡发生与降雨量和降雨强度的相关性,得到了浙江区域性滑坡发生的临界降雨量和降雨强度阈值,建立了适合于浙江省的突发性地质灾害预警预报系统.

目前,在降雨与滑坡关系研究方面,采用的方法主要是建立在统计学的基础上,利用已发生的滑坡点的降雨参数,确定研究区域的降雨临界值.研究的重点是区域滑坡与降雨过程的关系,即降雨临界值的表达雨量问题.本文以湖北省恩施地区为例,基于地质—气象耦合因素,建立了不同易发岩组—有效降雨强度模型,采用有效降雨强度(effective rainfall intensity,指一次降雨过程中,有效降雨量和持续时间的比值,mm/d)和关键降雨持续时间作为指标来确定降雨阈值的方法,提出研究区的滑坡灾害危险性预警判别模型.

1 研究区地质环境概况

选取湖北恩施 1 000 km² 区域范围作为本次研究区域(图 1),该区地处湖北省西南部褶皱山地,属云贵高原的东延部分,是地质灾害频发地区.

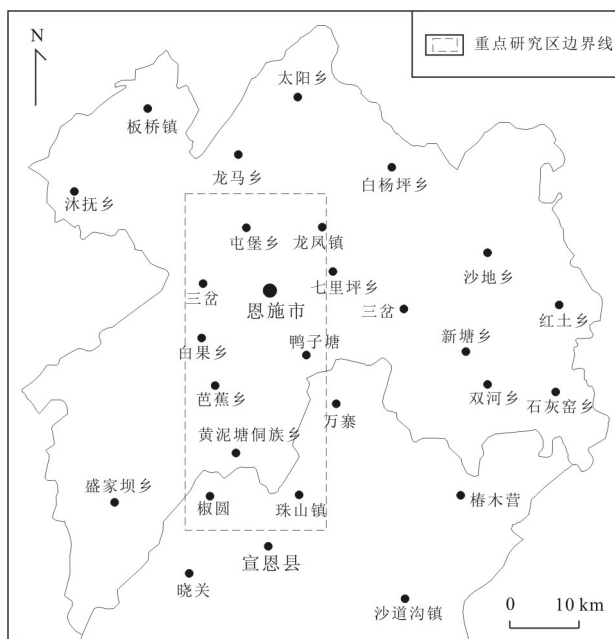


图 1 重点研究区位置

Fig.1 Location of study area

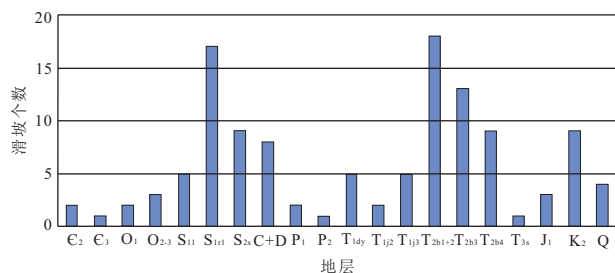


图 2 滑坡与地层关系

Fig.2 The relationship between landslide and formation

区域内主要地层有寒武系(C)、奥陶系(O)、志留系(S)、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)、第三系(E)及第四系(Q)等,基岩出露居多,第四系主要分布于清江及其支流两岸河谷谷坡上,分布零星,厚度不大.根据研究区地层分布情况及各地层的岩性,可将地层划分为 5 个岩组:块状结构硬质岩(T_{3s})、层状结构硬质岩(T_{1j2}、T_{1j3}、O、C、J、P₁₊₂)、层状硬质岩夹软弱岩(K、T_{1dy}、C+D)、层状软弱岩(T_{2b}、S)和松散体(Q).滑坡的生成与地层岩性、大地构造等密切相关(简文星, 2013),由图 2 可知,研究区的滑坡主要发生在三叠系巴东组地层与志留系地层中,占整个滑坡的 71.0%;其次是白垩、泥盆与石炭系地层,滑坡发育数占整个滑坡的 13.0%;其他地层发育滑坡灾害数共占滑坡总数的 16.0%.

2 建立滑坡灾害危险性预警判别模型

2.1 滑坡发生与有效降雨量的关系

笔者统计鄂西恩施地区部分滑坡点的降雨资料,得到图 3.图 3 中显示,大部分的滑坡发生时:当日降雨量小于 20 mm,甚至低至 0 mm,而有效降雨量从 10~100 mm 不等,这是滑坡滞后的表现.此时,对滑坡起决定性作用的是有效降雨量,前期降雨的持续,使得土体含水量增加,甚至饱水,因此即使当日降雨量很小,若前期有效降雨量达到了降雨临界值,滑坡也会发生.所以,对于滑坡发生前期有连绵阴雨而当日无大雨或暴雨类型的滑坡,起主导控制作用的是前期有效降雨量.

2.2 模型参数的确定

触发滑坡的降雨分为 2 个阶段:第一个阶段为前期降雨,此阶段的降雨使滑坡的土体含水量增加,抗剪强度降低,起到了孕育滑坡的作用;第二阶段为关键降雨阶段,此阶段的降雨直接接触滑坡发生.由于一次降雨并不一定会导致滑坡的发生,而每次降雨量中也只有部分对滑坡发生起作用,累计降雨量显然不能作临界降雨量,因此,用一段时间的当天降雨量分别乘以有效降雨系数得到有效降雨量.公式(1)用于计算有效降雨量,通过对研究区域的降雨资料进行统计分析发现,当降雨系数取值为 0.8 时,有效降雨量与滑坡数量之间的相关性系数达到最大值.

$$R_c = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \cdots + \alpha^n R_n, \quad (1)$$

式中: R_c 为有效降雨量; R_0 为当天降雨量; R_n 为日前降雨量; α 为降雨系数; n 为降雨持续天数.为了确定 n 值,选取 1997 年 7 月降雨数据,建立降雨数据表,同时统计当年 7 月份历史滑坡数据,使用 SPSS 软件做相关性分析,求取降雨量因子与滑坡发生的相关系数(结果见表 1).由表 1 可得,滑坡发生的概率与前 5 日有效降雨量最相关,说明前期有效降雨量与滑坡发生具有显著相关性,因此模型 n 值选定为 5.

2.3 预警模型基本思路

本文滑坡时间预警采用基于易发岩组的有效降雨强度时间模型,预警预报指标为:有效降雨强度(有效降雨量与降雨持续时间的比值)、持续时间.主要思路如下:

(1)统计恩施地区已有的滑坡点,结合滑坡灾害点的地质岩性特征,按地质岩性将研究区地质分为高、中、低 3 组易发性滑坡地质灾害岩组.

(2)分岩组统计滑坡有效降雨强度和关键降雨

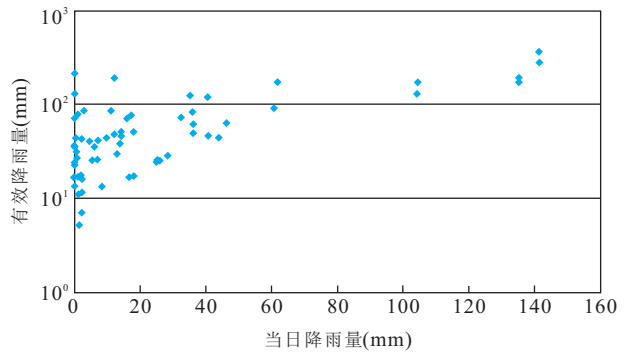


图 3 鄂西恩施地区部分滑坡发生当日降雨量与前期有效降雨量散点图

Fig.3 Scatter diagram of landslide effective rainfall- rainfall in Enshi section of western Hubei

持续时间的关系,得到不同岩组关于有效降雨强度(I)与持续时间(D)之间的滑坡发生概率散点关系图(如图 4 中 $I-D$ 散点图).

(3)根据步骤 2 所得到的 $I-D$ 散点图,得出滑坡发生概率分别为 10%、25%和 50%有效降雨强度的阈值线.

(4)利用有效降雨强度阈值线,对降雨因素引起滑坡灾害的危险性进行等级划分,可划分为高、中、低危险性 3 个等级.当滑坡预警点处于阈值线 50%的上方时,则表明有效降雨强度已经达到滑坡发生概率为 50%时的有效降雨强度阈值,此时滑坡发生的概率大于 50%,该预警点属于高危险区;同理,若预警点处在阈值线 25%~50%之间,则属于中危险区;若处在阈值线 25%~10%之间,则属于低危险区.

(5)选取研究区内某一数据完整的样本区进行滑坡灾害空间区划,主要考虑因素如下:地形、岩性、构造、坡体结构、水文地质、不良地质现象和人类工程活动.采用信息量法,得到样本区内各个因素引起的滑坡灾害空间分布图件,使用 GIS 的空间分析功能,将单因素图件进行叠加,得到样本区的滑坡灾害和主要影响因素的综合图件.结合野外调查及所得到的信息量 I 值的大小,把预测结果划分为 4 个等级:高易发性($I \geq 3$)、中易发性($0 \leq I < 3$)、低易发性($-5.0 \leq I < 0$)和不易发性($I \leq -5.0$).由于样本区与研究区的地质背景与外界自然环境一致,因此将样本区的滑坡易发性分区结果推广应用于待测研究区,对待评测区各单因素网格进行信息量值赋值,形成具有信息量值的单因素图,基于 GIS 叠加各单因素图件,从而得出待测评研究区的易发性分区图件.

表 1 滑坡发生前 6 日有效降雨量与滑坡发生的相关性

Table 1 Correlation between landslide and effective rainfall 6 days before the occurrence of landslide

降雨量	1 日有效降雨量	前 2 日有效降雨量	前 3 日有效降雨量	前 4 日有效降雨量	前 5 日有效降雨量	前 6 日有效降雨量	一周累计降雨量	一次过程降雨量	一月累计降雨量
相关系数	0.550	0.546	0.607	0.560	0.669	0.582	0.346	0.378	0.486

表 2 预警区等级初步划分

Table 2 Classification of hazard level in warning area

空间区划	低危险性	中危险性	高危险性
高易发区	不预警区(2 级)	4 级预警区	5 级预警区
中易发区	不预警区(1 级)	3 级预警区	4 级预警区
低易发区	不预警区(1 级)	3 级预警区	4 级预警区
不易发区	不预警区(1 级)	不预警区(1 级)	不预警区(2 级)

表 3 预警等级含义及其防御措施

Table 3 Meaning of warning level and corresponding defense measures

预警等级灾害发生情况(24 h 内)		防御措施
1 级预警区	灾害发生可能性极小	不采取措施
2 级预警区	灾害发生可能性较小	启动重要灾害隐患点的群测群防工作
3 级预警区	灾害发生可能性中等(注意)	注意对灾害点的监测,采取防御措施,提醒灾害易发区内的人员关注灾害动态
4 级预警区	灾害发生可能性较大(预警)	应加强对灾害点的监测,对灾害危险区应开展预防应急措施
5 级预警区	灾害发生可能性极大(警报)	应全天候对灾害点进行监测,建立防御措施和救灾体系、组织紧急疏散通道等

(6)利用 GIS 将滑坡空间易发性区划结果与降雨危险性等级划分结果相叠加,根据表 2 降雨量危险等级预警判别式,可得到研究区域滑坡灾害危险性预警图,表 2 中每一等级所代表的含义见表 3,预警等级越高,则说明滑坡发生的概率越大。

2.4 具体预警步骤

根据恩施地区滑坡与地层的关系图(图 2),可知,研究区滑坡主要发生在志留系、三叠系巴东组,其次是泥盆系和白垩系,而二叠系、奥陶系、侏罗系和寒武系发育滑坡较少,故将研究区划分为以下岩组:高易发性岩组(S、T_{2b})、中易发性岩组(O、C+D、T_{1j}、T_{1dy}、K、Q)、低易发性岩组(E、P、T_{3s}、J)。

统计各岩组的有效降雨量和关键降雨持续时间信息,以有效降雨强度的常用对数为纵坐标,持续时间的常用对数为横坐标,得到含有滑坡发生概率信息的 I-D 散点图(图 4)。

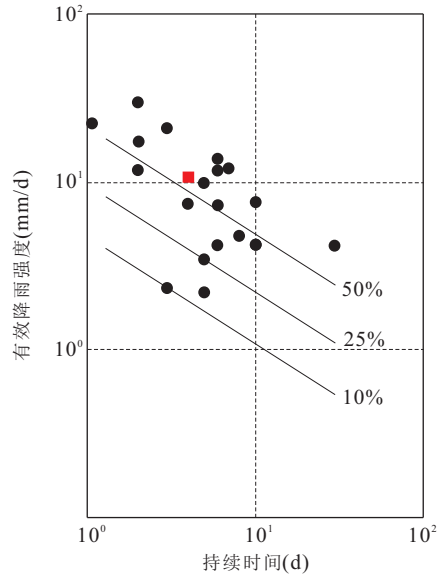


图 4 高易发岩组滑坡有效降雨强度阈值

Fig.4 Effective rainfall intensity threshold of landslide in the high susceptibility petrofabric

根据 I-D 散点图,按照 10%、25% 和 50% 三个滑坡发生概率,分别作出相应概率下的有效降雨强度阈值线,其中 10% 所对应的阈值线为滑坡危险性预警等级的下界。图 4 中,滑坡发生概率为 50% 时所对应的有效降雨强度阈值线为 $I = 21.283D^{-0.6393}$, 滑坡发生概率为 25% 时所对应的有效降雨强度阈值曲线为 $I = 9.636D^{-0.6393}$, 滑坡发生概率为 10% 时所对应的有效降雨强度阈值曲线为 $I = 4.700D^{-0.6393}$ 。

图 5 中,该有效降雨强度阈值线图中,滑坡发生概率为 50% 时所对应的阈值曲线为 $I = 25.817D^{-0.3919}$, 25% 时所对应的阈值曲线为 $I = 12.173D^{-0.3919}$, 10% 时所对应的阈值曲线为 $I = 5.740D^{-0.3919}$ 。

图 6 中,该有效降雨强度阈值线图中,滑坡发生概率为 50%、25% 和 10% 时分别对应的滑坡灾害有效降雨强度阈值曲线为 $I = 29.283D^{-0.3243}$, $I = 18.826D^{-0.3243}$, $I = 12.103D^{-0.3243}$ 。

根据实时有效降雨强度信息在降雨阈值线图中所处的位置,根据分级判别表 4,得到由有效降雨量

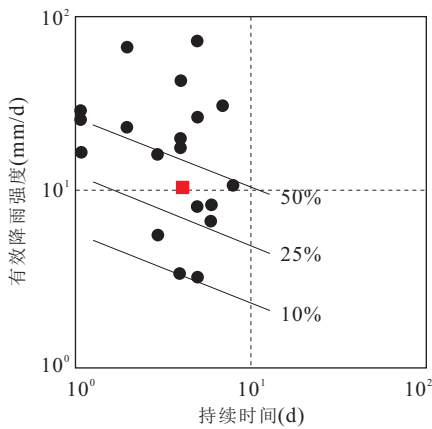


图 5 中易发岩组滑坡有效降雨阈值

Fig.5 Effective rainfall intensity threshold of landslide in the middle susceptibility petrofabric

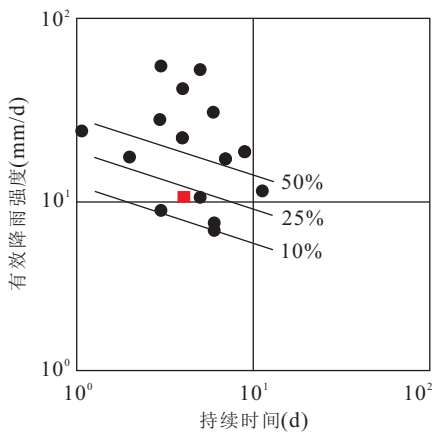


图 6 低易发岩组滑坡有效降雨阈值

Fig.6 Effective rainfall intensity threshold of landslide in the low susceptibility petrofabric

表 4 有效降雨引起的滑坡危险性等级划分

Table 4 Risk grades distribution for landslide induced by effective rainfall

散点所处位置	10%下方	10%~25%	25%~50%	50%上方
危险性等级	无危险性	低危险性	中危险性	高危险性

引起的滑坡灾害危险性等级分级结果。

3 实例验证

对于建立的不同易发岩组—有效降雨强度预警模型,为了验证其预警结果的可靠性,选取研究区 2007 年 7 月 27 日—2007 年 8 月 1 日这一阶段的实时降雨数据信息进行滑坡灾害预警预报,将预警结果与实际情况相对比,检验该模型的预警能力。

3.1 预警结果

滑坡发生当日及其前期的降雨实时数据见表 5,由表 5 中数据可知,2007 年 8 月 1 日当日降雨量 R_0 为 4.6 mm,结合公式(1)可得有效降雨量为 44.67 mm,有效降雨强度为 8.93 mm/d;关键降雨持续天数 n 取值为 5 时,各易发岩组的有效降雨强度阈值见表 6.将有效降雨强度值 8.93 mm/d 与表 6 中的数据进行对比,结果显示:对于高易发岩组,有效降雨强度为 8.93 mm/d 时对应的滑坡发生概率大于 50%,属于高危险区;对于中易发岩组,滑坡发生概率大于 25%而小于 50%,属于中危险区;对于低易发岩组,滑坡的发生概率大于 10%而小于 25%,属于低危险区,在图 4~6 中以方形点表示。

因此,2007 年 8 月 1 日,滑坡灾害会发生的最大概率在高易发岩组(S、 T_2b)。根据由有效降雨引起的滑坡危险性等级预警分级结果,叠加研究区的滑坡空间易发性区划结果(图略),可以得出整个研究区的滑坡灾害危险性预警图(图 7)。由图 8 可知,在此期间滑坡灾害会发生在高易发岩组(S、 T_2b)中。而 2007 年 8 月 1 日实际发生滑坡的位置为恩施市舞阳办事处周家河村桂花树组,发生滑坡的地层为三叠纪中统巴东组紫红色泥质砂岩、粘土岩,属高易发岩组,落在滑坡灾害危险性预警图中的 5 级预警区内。由此可见,根据预警模型所得预测结果与实际结果高度吻合,证明模型是切实可行的,且预测结果精准。

3.2 模型优势分析

模型的建立一方面统计分析研究了研究区内滑坡的分布特征,并根据滑坡成因规律与岩性的关系,按照高、中、低 3 类易发性岩组,分析由降雨因子引起的滑坡灾害危险性;另一方面,根据研究区内地质特征,选取影响滑坡灾害的因子,建立滑坡灾害易发性评价指标体系,对研究区进行滑坡灾害空间易发性区划,将区划结果作为预警结果的一个影响因素。由此可见,不同易发岩组—有效降雨强度模型考虑的因素全面,与仅考虑降雨因子的预测模型相比,该模型结合区域地质背景的研究前提,使得模型的预警更贴合实际环境,具有考虑全面、预警精度高的特点,在实际预警中切实可用。

在综合考虑地层岩性与滑坡分布特征关系条件下,从降雨因子入手,使用降雨持续时间来确定有效降雨强度。与传统的平均降雨强度不同,有效降雨强度强调的是降雨过程,它量化了前期降雨时期内对滑坡发生起显著作用的雨量,突出了滑坡发生

表 5 2007 年 8 月 1 日滑坡前期降雨数据

Table 5 Antecedent rainfall data of landslide occurred on August 1, 2007

时间	7 月 27 日	7 月 28 日	7 月 29 日	7 月 30 日	7 月 31 日	8 月 1 日
降雨量(mm)	2.6	2.2	20.0	39.5	3.5	4.6

表 6 2007 年 8 月 1 日滑坡危险性预警等级

Table 6 Hazard warning classification of landslide occurred on August 1, 2007

岩组	高易发岩组			中易发岩组			低易发岩组		
滑坡发生概率(%)	50	25	10	50	25	10	50	25	10
有效降雨强度阈值(mm/d)	8.77	3.97	1.94	15.00	7.07	3.33	18.68	12.01	7.72

4 结论

(1)对于发生前期有连绵阴雨当日无大雨或暴雨类型的滑坡:在前期连续几日降雨的影响下,滑坡表现出一定的滞后性,此时滑坡的发生受前期有效降雨强度控制,若前期有效降雨强度达到临界阈值,则滑坡发生,且发生的概率与前 5 日有效降雨量最相关,而当日降雨量可以很小甚至接近于 0 mm.

(2)在验证案例分析中,基于易发岩组统计了的前期降雨量和降雨持续时间实时数据,采用不同易发岩组—有效降雨强度预警模型得到的预警结果为:2007 年 8 月 1 日,周家河村桂花树组处于 5 级预警区,滑坡灾害会发生在高易发岩组(S、T_{2b})中;预警结果与实际情况完全吻合.

(3)预警模型的建立主要从降雨因子入手,有效降雨强度阈值线的确定采用了降雨持续时间,这突出了不同时期的降雨量诱发滑坡的不同权重值,使得模型预测具有针对性;另外,模型不仅考虑了不同易发性的岩组对由降雨所引起的滑坡灾害危险性等级分级,还叠加了已考虑地形、岩性、构造、坡体结构、水文地质、不良地质现象和人类工程活动这 7 种影响因子而得出的滑坡灾害空间易发性区划结果,使得模型具有预警考虑全面,精准度高的特点.

(4)利用预警模型对研究区滑坡危险性进行预警等级划分,发布预警结果,同时结合群测群防网络体系,直接通知监测责任人,做好防灾、避灾准备,此预警方法实用、可行.

References

- Aleotti, P., 2004. A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failures. *Engineering Geology*, 73(3): 247—265. doi:10.1016/j.enggeo.2004.01.007

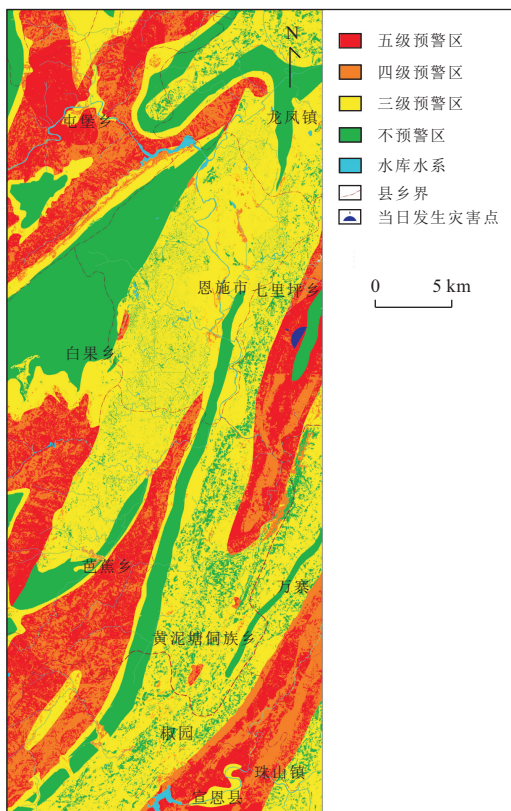


图 7 恩施地区滑坡灾害危险性预警

Fig.7 Risk warning of landslide in Enshi

当天及前几日的降雨量在整个滑坡触发过程中的权重,为模型预测的精确度作出了贡献.

此外,模型中 I-D 散点图所使用的降雨实时数据详实、分布范围广,由此所确定的有效降雨强度阈值线更为精确,贴近实际情况,使得预测结果更为可靠.

- Brand, E. W., Premchitt, J., Phillipson, H. B., 1984. Relationship between Rainfall and Landslide in Hong Kong. *Proceeding 4th International Symposium on Landslides, Toronto, Canada*, 1: 377—384.
- Campbell, R. H., 1974. Debris Flow Originating from Soil Slip during Rainstorm in Southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 7(4): 339—349. doi:10.1144/GSL.QJEG.1974.007.04.04
- Cannon, S. H., Ellen, S. D., 1985. Rainfall Conditions for Abundant Debris Avalanches, San Francisco Bay Region, California. *California Geology*, 38(12): 267—272.
- Dieu, T. B., Pradhan, B., Lofman, O., et al., 2013. Regional Prediction of Landslide Hazard Using Probability Analysis of Intense Rainfall in the Hoa Binh Province, Vietnam. *Natural Hazards*, 66(2): 707—730. doi:10.1007/s11069-012-0510-0
- Fukuzono, T., 1990. Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure. *Landslide News*, 4: 9—12.
- Glade, T., 1997. The Temporal and Spatial Occurrence of Rainstorm-Triggered Landslide Events in New Zealand. Department of Geography, Victoria University of Wellington, Canada.
- Jian, W. X., Yang, J., 2013. Formation Mechanism of No. 1 Part Slide of Huangtupo Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(3): 625—631 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., 2005. Method for the Warning of Precipitation-Induced Landslides (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Montrasio, L., Valentino, R., Losi, G. L., 2011. Towards a Real-Time Susceptibility Assessment of Rainfall-Induced Shallow Landslides on a Regional Scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7): 1927—1947. doi:10.5194/nhess-11-1927-2011
- Qiao, J. P., Yang, Z. J., Tian, H. L., 2009. Probability Analysis Based Method for Rainfall-Induced Landslide Warning. *Journal of Engineering Geology*, 17(3): 343—348 (in Chinese with English abstract).
- Schmidt, J., Turek, G., Clark, M. P., et al., 2008. Probabilistic Forecasting of Shallow, Rainfall-Triggered Landslides Using Real-Time Numerical Weather Predictions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(2): 349—357. doi:10.5194/nhess-8-349-2008
- Sheng, X. J., 2011. Research and Application on the Approach of Rainfall-Induced Landslides Meteorological Forecast and Warning Based on Landslide Hazard Zoning (Dissertation). Chongqing University, Chongqing (in Chinese with English abstract).
- Sun, M. L., 2012. Study on the Effect of Rainfall to Anbushan Landslide (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Takara, K., Yamashiki, Y., Sassa, K., et al., 2010. A Distributed Hydrological-Geotechnical Model Using Satellite-Derived Rainfall Estimates for Shallow Landslide Prediction System at a Catchment Scale. *Landslides*, 7(3): 237—258. doi:10.1007/s10346-010-0214-z
- Wieczorek, G. F., 1987. Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains, California. *Reviews in Engineering Geology*, 7(1): 93—104.
- Yin, K. L., Liu, Y. L., Wang, Y., et al., 2012. Physical Model Experiments of Landslide-Induced Surge in Three Gorges Reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 1067—1074 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Zhang, G. R., 2003. A Real Time Warning System Design of Geo-Hazards Supported by WebGIS in Zhejiang Province, China. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 46(3): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. R., Yin, K. L., Liu, L. L., et al., 2005. A Real-Time Regional Geological Hazard Warning System in Terms of WebGIS and Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 26(8): 1312—1317 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 简文星, 杨金, 2013. 三峡库区黄土坡滑坡 I 号崩滑体成因. 地球科学——中国地质大学学报, 38(3): 625—631.
- 李媛, 2005. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究 (博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 乔建平, 杨宗佶, 田宏岭, 2009. 降雨滑坡预警的概率分析方法. 工程地质学报, 17(3): 343—348.
- 盛晓杰, 2011. 基于边坡危险性区划的降雨型滑坡预报预警方法研究及应用 (硕士学位论文). 重庆: 重庆大学.
- 孙鸣雷, 2012. 降雨对温州市安埠山滑坡稳定性影响研究 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等, 2012. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验. 地球科学——中国地质大学学报, 37(5): 1067—1074.
- 殷坤龙, 张桂荣, 2003. 基于 WebGIS 的浙江省地质灾害实时预警预报系统设计. 水文地质工程地质, 46(3): 19—23.
- 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等, 2005. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统. 岩土力学, 26(8): 1312—1317.