

孙瑜, 韦玮, 王宝亮, 等. 降雨作用下滑坡灾害监测预警研究——以遂宁市船山区为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 64 – 68. [SUN Yu, WEI Wei, WANG Baoliang, et al. Study on Monitoring and Early Warning of Landslide Hazard under Rainfall——Taking Sunning Chuanshan as an Example[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 64 – 68. doi: 10.3969/j.issn.1000 – 811X. 2022. 04. 011.]

降雨作用下滑坡灾害监测预警研究^{*}

——以遂宁市船山区为例

孙瑜¹, 韦玮², 王宝亮², 李宏俊³

(1. 四川省核工业地质调查院, 四川 成都 610061; 2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 3. 云南国土资源职业学院, 云南 昆明 652501)

摘 要:通过对四川省遂宁市船山区2001—2020年的地质灾害排查和降水量资料分析, 区内滑坡灾害90%以上发生在汛期, 降雨作为滑坡主要诱发因子, 对滑坡之类的斜坡灾害的形成起决定性作用。船山区位于川中丘陵带, 境内滑坡地质灾害频发, 结合历年滑坡动态变化数据的分析, 考虑最大单日降雨量、月累计降雨量与滑坡发生频度的关系, 以历史降雨数据和当日降水量数据为依据, 建立滑坡降雨预警模型, 得出滑坡不同发生概率对应的滑坡失稳破坏前3 d期降水量和当日降水量, 结合不同设计频率最大暴雨量计算分析和滑坡不同变形阶段的破坏特征, 提出船山区滑坡监测预警模型、预警方案和预警阈值, 对增强当地滑坡灾害防御能力和主动避灾防灾具有一定实际依据。

关键词: 船山区; 滑坡; 强降雨; 预警阈值; 四川遂宁

中图分类号: X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 – 811X(2022)04 – 0064 – 05

doi: 10.3969/j.issn.1000 – 811X. 2022. 04. 011

四川地跨中国Ⅰ、Ⅱ级地貌台阶, 地质环境较为脆弱, 属于全国地质灾害发育最严重的省份之一, 近年极端天气成频发、多发、高发态势, 地质灾害防治工作形势严峻。降雨是导致地质灾害失稳的“元凶”之一^[1-2], 尤其对滑坡、崩塌之类的斜坡地质灾害的形成起决定性作用。

国内外众多学者开展研究滑坡和降雨量的关系, 已提出不同的滑坡灾害预警预报方法^[3-7]。研究发现, 滑坡失稳破坏在过程降雨量和降雨强度两个参数中, 均存在临界值^[8], 当某次降雨发生时, 其累计降雨量或降雨强度达到或超过其临界值, 极可能导致滑坡灾害成群出现。本文选择四川丘陵区遂宁市船山区为研究区, 应用气象-地质耦合模型进行地质灾害监测预警分析。

船山区地处涪江中游, 位于四川盆地腹心, 境内沟谷迂回, 丘包群立, 宽缓展布, 属于四川盆地典型的因构造剥蚀而成的丘陵景观, 涪江两岸大量分布河流堆积阶地。研究区位于新华夏系第三沉降带, 地处四川沉降褶皱带之川中褶皱带内, 其构造特点表现为以褶皱为主, 构造形迹主要为近东西向, 褶皱宽阔平缓, 区域上表现为排列有序的箕状向斜和鼻状背斜。境内主要出露中

生界侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)、上统遂宁组(J_3s)和蓬莱镇组(J_3p), 以及第四系全新统(Q_4)地层, 基岩主要为近水平状的红色泥岩、砂岩。全区处于四川盆地亚热带湿润季风气候区, 四季分明, 雨量充沛, 气候温和, 季风气候显著, 具有冬暖春早、夏热秋凉、云雾多、日照少、无霜期长等特点。船山区多年平均气温为17.6℃, 每年降雨主要发生在4—10月, 占全年降水量的74.6%。

1 降雨与滑坡的关系

根据对2001—2020年船山区降雨资料分析, 区内多年平均降雨量约982.8 mm, 常年降雨量549.8~1311.0 mm, 最大日降水量50.2~323.7 mm。通过分析该区近年开展的多次地质灾害调查、排查及核查资料, 收集当地各行业管理的相关地质灾害统计数据, 得到区内滑坡灾害隐患点历年变化情况(表1)。

通过分析历年滑坡失稳破坏时对应的当日降雨量和月累计降雨量数据, 可以编绘对应的失稳滑坡数量与日最大降雨量关系图(图1)、失稳滑坡数量与月累计降雨量关系图(图2)。

^{*} 收稿日期: 2022-04-11 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0968)

第一作者简介: 孙瑜(1984-), 男, 汉族, 重庆长寿人, 高级工程师, 主要从事地质灾害形成机制与防治技术研究。

E-mail: qubo-88@163.com

表 1 船山区 2001—2020 年的降水量和滑坡统计表

年份	年降水量/mm	最大日降水量/mm	新增滑坡数/处	核销滑坡数/处
2001	877.8	122.7	/	/
2002	1 097.5	199.8	/	/
2003	1 072.1	129.5	/	/
2004	837.4	65.2	1	/
2005	1 058.9	81.3	/	/
2006	549.8	59.7	1	/
2007	933.7	136.9	3	/
2008	859.0	103.7	1	1
2009	990.0	124.0	2	/
2010	1 146.9	141.9	3	/
2011	893.1	103.6	8	/
2012	1 082.9	85.9	1	1
2013	1 311.0	323.7	40	1
2014	1 086.5	95.5	2	1
2015	1 123.4	132.7	2	5
2016	803.5	50.2	4	3
2017	795.6	57.0	5	19
2018	931.8	112.2	7	12
2019	1 039.2	93.0	1	10
2020	1 166.6	72.7	6	10

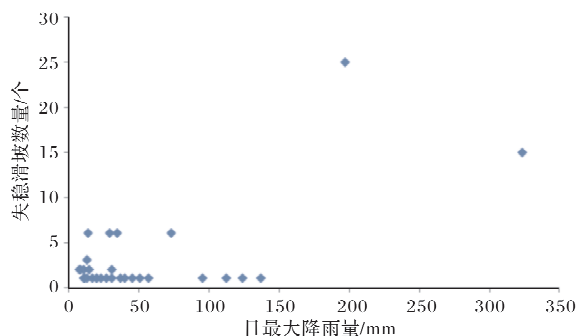


图 1 日最大降雨量与失稳滑坡数量关系图

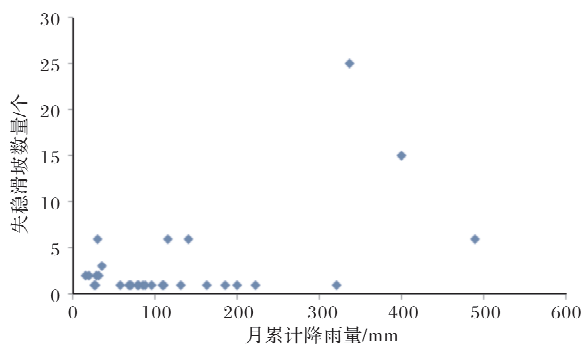


图 2 月累计降雨量与失稳滑坡发生数量关系图

1.1 滑坡频度与最大单日降雨量的关系

从图 1 可以看出, 船山区日最大降雨量在 30 ~ 80 mm 之间所引起的滑坡数量较多, 在日最大降雨量超过 190 mm 后滑坡失稳数量达到峰值。在一般年份下, 滑坡多发生在日降雨量位于 20 ~ 50 mm 之间。位于图 1 上方的两个点分别对应 2013 年 6 月 30 日和 2013 年 7 月 1 日的两次较大的降雨事

件, 相应的单日降雨量分别为 323.7 mm 和 197.1 mm, 其引发的滑坡数量最多。

1.2 滑坡频度与月累计降雨量的关系

从图 2 可以看出, 船山区滑坡多发生在月累计降雨量超过 100 mm 时, 而累计降雨量达到 330 mm 时, 失稳滑坡数量达到峰值。

参考陈伟^[8]的框架: 降雨诱发滑坡与前期降雨以及当日降雨关系密切。本文选用滑坡失稳破坏前 3 d 期降水量 (R_3) 和当日降水量 (R_0) 作为预警预报参数, 由于船山区内各雨量站建站时间不一, 控制范围有限, 并不能完全反映滑坡失稳处局地实际降水量, 基于偏安全考虑^[8], 将图 3 中左下角位于滑坡点总数 10% 的边界作为滑坡发生概率为 10% 的下包络线, 将此下包络线做平行线移至上方包括滑坡点总数 90% 的位置, 此线作为上包络线, 根据上、下包络线中间区域滑坡数据分布的离散特征, 以包罗尽量多的高频降雨量激发的滑坡点数据为原则, 确定滑坡发生概率 $Pro = 50\%$ 对应界线^[9], 相应数据见表 2。

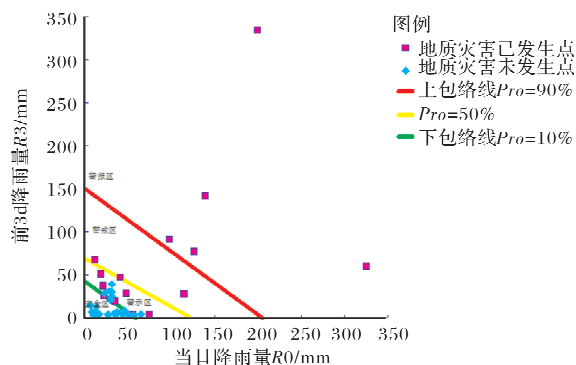


图 3 船山区滑坡降雨预警模型

表 2 滑坡不同发生概率对应 $R0$ 、 $R3$ 值		
滑坡发生概率 $Pro/\%$	$R0/\text{mm}$	$R3/\text{mm}$
10	50	42
50	120	70
90	200	150

2 滑坡灾害监测预警设置建议

2.1 不同设计频率最大暴雨量

船山区年最大 1/6 h、1 h、6 h、24 h 点雨量均值和变差系数主要来源《四川省暴雨统计参数图集(川水发[2010]15 号)》，结合 $Cs = 3.5Cv$ 的皮尔逊Ⅲ型曲线的分析，获取不同频率对应的模比系数，从而计算得出不同设计频率对应最大暴雨量(表 3、表 4)。

表 3 不同时间段设计降雨量基础参数			
雨量均值 H/mm		变差系数 Cv	
1/6 h	16	$Cv1/6$	0.35
1 h	42	$Cv1$	0.45
6 h	74	$Cv6$	0.45
24 h	100	$Cv24$	0.50

2.2 滑坡预警

滑坡预警应结合滑坡隐患点的基本地质特征、形成机制及发展变化趋势，在全面统筹考虑的基础上，合理确定有效预测参数^[10-12]。通常情况下，浅表层位移监测数据是滑坡隐患预测的基本参数，降雨量、地下水动态等监测数据属于滑坡隐患预测的表征参数。同时，滑坡预警亦需全面考虑宏

观前兆变形现象。

(1)预警模型。滑坡预警模型建立和预警判据确定，建议参照以下方法和原则：

①合理建立适宜的滑坡地质模型，辅以科学的监测方法和监测内容，确定有针对性的滑坡预警模型。

②积极建立工程地质类比分析、决策树、层次分析、逻辑回归、人工神经网络、支持向量机和随机森林等数学模型，进行多因子和多模型的综合评判，保证滑坡预警的准确度。

③滑坡预警模型建立后，积极利用已获取历史上的滑坡失稳监测资料，进行反演分析，并检验模型的适宜性和有效性，最后确定相应的滑坡灾害预警判据。

④通过对宏观地表变形迹象、自动化监测设备获取的数据分析，以及区域地质灾害气象预报的综合研判，参考地表位移、位移变形速率和位移加速度等监测结果，从而确定滑坡预警模型，最后确定四级预警的相关指标。

⑤通过不同类型预警指标获取相应参数来确定预警等级存在差异性，预警结果应结合上述参数综合判定。

滑坡地质灾害预警模型可见图 4。

(2)预警方案。监测阶段主要结合滑坡诱发因素和变形失稳的运动特点，采用地表裂缝位移监测、降雨量监测^[13-16]。按坡体变形破坏的变形特点、发展阶段及可能发生的时间，可将滑坡预警监测概括为四类^[17]：Ⅰ级(警报)、Ⅱ级(警戒)、Ⅲ级(警示)、Ⅳ级(注意)。基于斜坡变形演化三阶段理论进行预警分级(图 5)。

表 4 不同设计频率最大暴雨量计算表

项 目	最大暴雨量/mm			
	100 年一遇 $P = 1\%$	50 年一遇 $P = 2\%$	20 年一遇 $P = 5\%$	10 年一遇 $P = 10\%$
10 min 雨强($H1/6p$)	33.8	30.7	26.7	23.5
1 h 雨强($H1p$)	105.8	94.5	79.0	67.2
6 h 雨强($H6p$)	186.5	166.5	139.1	118.4
24 h 雨强($H24p$)	274.0	242.0	199.0	166.0

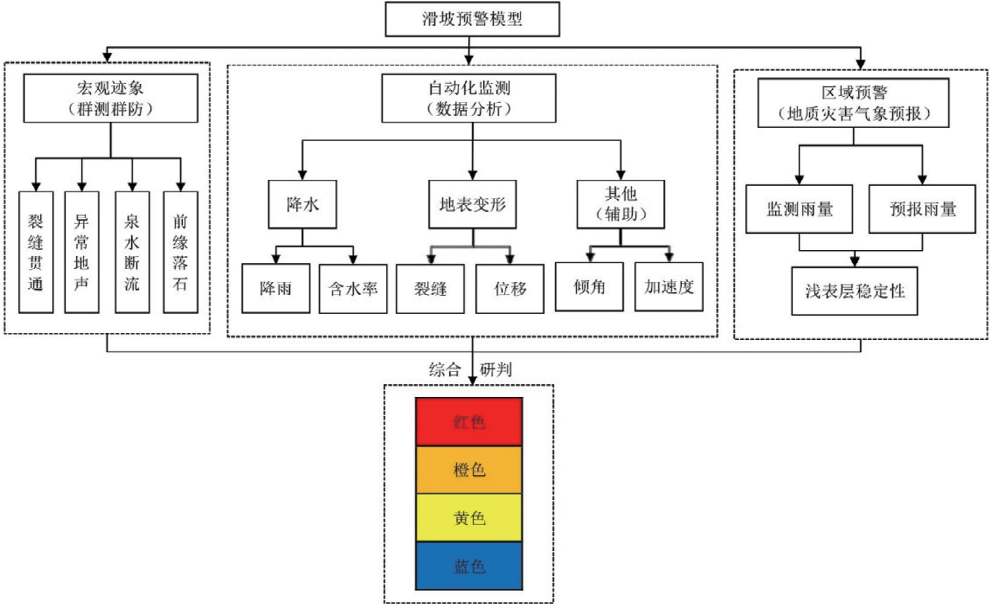


图 4 滑坡地质灾害预警模型

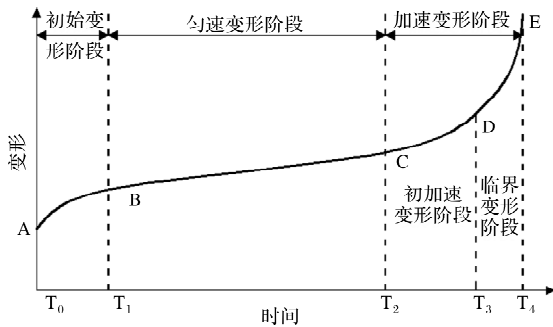


图5 滑坡变形的三阶段演化图

① I 级(警报): 滑坡处于临界变形状态, 如图 5 所示 DE 段, 短期临滑前变形征兆特征极为显著, 在数小时或数日内发生失稳的概率极大。由警报降雨量、变形位移、变形速度、变形加速度等指标确定。降雨量达到警报雨量阈值, 同时参考位移参数变化情况确定。采取措施: 组织应急抢险队伍, 第一时间撤离危险区和影响区的所有人员, 并对相关区域进行交通管制。

② II 级(警戒): 滑坡处于初始加速变形阶段, 如图 5 所示 CD 段, 局部地段出现滑坡宏观变形前兆特征, 在数日内或数周内发生破坏的概率较大。由警报降雨量、变形位移、变形速度、变形加速度等指标确定。降雨量达到相应的警报雨量阈值, 并结合地表位移监测指标变化情况综合确定。采取措施: 增大所有监测项目的专业监测频率, 启动相应的应急预案, 划定滑坡灾害的危险区和影响区, 组织危险区内的所有人员迅速撤离避让, 并对滑坡危险区进行交通管制。

③ III 级(警示): 滑坡处于匀速变形阶段, 如图 5 所示 BC 段, 坡体出现明显变形, 在数月或 1 年内发生破坏的概率很大。由警报降雨量、变形位移、变形速度、变形加速度等指标确定。降雨量达到相应的警报雨量阈值, 并结合地表位移监测指标变化情况综合确定。采取措施: 组织专业监测人员进行专业加密监测。

④ IV 级(注意): 滑坡处于初始变形阶段, 如图 5 所示 AB 段, 1 年内发生破坏的可能性不大。由警报降雨量、变形位移、变形速度、变形加速度等指标确定。降雨量达到相应的警报雨量阈值,

并结合地表位移监测指标变化情况综合确定。采取措施: 加强群测群防工作, 并制定应急预案。

根据滑坡变形各类相关监测数据, 进行综合分析, 当监测参数达到某一预警等级值或情况时, 按“就高不就低”的原则, 赓即启动相应的预警预案。根据船山区实际情况, 降雨量作为首要监测指标, 当小时降雨量、日降雨量、累计降雨量达到预警值时, 即可确定相应预警等级; 此外, 地表裂缝位移监测作为次要监测指标, 同时考虑雨水等的影响; 在上述基础上, 结合滑坡隐患点群测群防监测员获取的实时情况相应启动适宜的预警等级。综合上述情况, 当地政府应及时组织专家、政府管理人员进行会商, 启动相应的滑坡应急预案, 重点是优先级应急预案。

(3) 预警阈值。根据表 3 至表 5 获取的降雨相关数据, 结合船山区地质灾害风险动态管控机制, 提出相应的滑坡灾害隐患点监测预警阈值, 按照“一点一策”的原则调整单点的降雨阈值。滑坡预警等级同时结合“船山区近年开展的地质灾害自动化实时专业监测体系建设项目”监测预警阈值参数确定(表 5)。

3 结论和讨论

(1) 遂宁市船山区内发育的滑坡失稳与降雨关系密切, 尤其是滑坡失稳破坏前 3 d 期降水量(R_3)和当日降水量(R_0), 可以作为滑坡失稳的主要判识参数。

(2) 基于 20 年历史降雨数据分析, 初步建立滑坡降雨相关预警模型, 获取滑坡在不同发生概率时对应的 R_0 、 R_3 值, 结合不同设计频率最大暴雨量计算结果, 综合考虑从地质成因机制分析得出的滑坡不同变形阶段的破坏特征, 提出船山区滑坡监测预警模型、预警方案和预警阈值, 有助于指导当地滑坡灾害防御和主动避灾防灾。

(3) 鉴于滑坡失稳受多因素控制, 基于气象降雨模型的监测预警未全面纳入全部滑坡影响因子, 上述监测预警方案在接下来的地质灾害防治实践中, 仍需结合每年实际新增的滑坡灾害隐患情况, 进行相应修正, 提高预警精度, 才能达到有效服务于船山区滑坡灾害预警的目的。

表 5 滑坡监测预警等级表划分

预警级别	预警方式	告知方式	预警色	降雨量/mm	GNSS 位移 监测 位移 s /mm 速率 v /(mm/d) 加速度 a /(mm/d ²)	裂缝仪监测 位移 s /mm 速率 v /(mm/d)
I 级	警报级	应急响应	红	$H1p \geq 90$ $H24p \geq 200$	$s \geq 50$ $v \geq 10$ $a \geq 2$	$s \geq 100$ $v \geq 60$
II 级	警戒级	采取措施	橙	$75 \leq H1p < 90$ $190 \leq H24p < 200$	$15 \leq s < 50$ $5 \leq v < 10$ $1 \leq a < 2$	$50 \leq s < 100$ $40 \leq v < 60$
III 级	警示级	告知公众	黄	$70 \leq H1p < 75$ $180 \leq H24p < 190$	$5 \leq s < 15$ $1 \leq v < 5$ $0.5 \leq a < 1$	$20 \leq s < 50$ $20 \leq v < 40$
IV 级	注意级	技术、管理、 监测人员	蓝	前 3 d 累计雨量 $65 \leq H1p < 70$ $170 \leq H24p < 180$	$0 \leq s < 5$ $0 \leq v < 1$ $0 \leq a < 0.5$	$0 \leq s < 20$ $10 \leq v < 20$

注: 每个滑坡预警标准应根据现场监测结果进行实时动态调整。

参考文献:

- [1] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 303-309.
- [2] 狄清月, 许风雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 62-67, 93.
- [3] CHAN R K S, PUN W K. Landslip warning system in Hongkong[J]. Geotechnical News, 2004, 22(4): 33-35.
- [4] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.
- [5] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 98(3): 239-267.
- [6] 吴跃东, 向钊, 马玲. 安徽省地质灾害气象预警预报研究[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 25-29, 35.
- [7] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28-34.
- [8] 陈伟, 许强. 地质灾害降雨预警基准研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 393-398.
- [9] 李晓林. 风险统计模型[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2008: 157-161.
- [10] 郭富赞, 宋晓玲, 谢煜, 等. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 127-133.
- [11] 杨智琴. 山西省地质灾害气象预警模型探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 117-121.
- [12] 刘佳, 郭海燕, 邓国卫, 等. 川藏铁路四川段沿线诱发地质灾害降水阈值研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 83-91.
- [13] 覃瀚萱, 桂蕾, 余玉婷, 等. 基于滑坡灾害预警分级的应急处置措施[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 187-195.
- [14] DU J, YIN K L, Lacasse S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2013, 10(2): 203-218.
- [15] ZHOU C, YIN K, CAO Y, et al. Displacement prediction of step-like landslide by applying a novel kernel extreme learning machine method[J]. Landslides, 2018, 15(11): 2211-2225.
- [16] 董建辉, 吴启红, 万世明, 等. 突发滑坡灾害的应急监测预警技术体系[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(11): 135-140.
- [17] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.

Study on Monitoring and Early Warning of Landslide Hazard under Rainfall—Taking Sunning Chuanshan as an Example

SUN Yu¹, WEI Wei², WANG Baoliang², LI Hongjun³

(1. Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610061, China;

2. Nuclear Industry Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd.,

Chengdu 610000, China; 3. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, China)

Abstract: Based on the geological disaster investigation and rainfall data of Chuanshan district from 2001 to 2020, it is found that over 90% of landslide disasters occurred in flood season. As a main factor inducing landslide, rainfall plays a significant role in causing slope geological hazard. Chuanshan district is located in the hilly area of central Sichuan, landslide disasters occur frequently in the area, combined with the analysis of landslide dynamic change data over the years, considering the relationship between maximum daily rainfall, monthly cumulative rainfall and landslide frequency, based on the historical rainfall data and the precipitation data of the current day, early-warning model of landslide rainfall is established, and the three days of precipitation before landslide instability and failure and the precipitation of the current day corresponding to different landslide occurrence probabilities are obtained. Combined with the calculation and analysis of the maximum rainfall at different design frequencies and the damage characteristics of different deformation stages of the landslide, the monitoring and early warning model, early warning scheme and early warning threshold of landslide are proposed within Chuanshan county, which has certain practical foundation for enhancing the local landslide disaster prevention ability and leading disaster avoidance and prevention.

Keywords: Chuanshan district; landslide; strong rainfall; early-warning threshold; Sunning City in Sichuan