

基于过程降雨的红层丘陵低山区滑坡 灾害气象预警阈值研究

易靖松^{1,2}, 程英建², 徐乙³, 尹国龙²

(1.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2.中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 3.四川省地球物理调查研究所, 四川 成都 610041)

摘要: [目的] 研究不同历时降雨强度与区域滑坡灾害的关系, 并对滑坡灾害的气象预警阈值进行研究, 为地方管理部门地质灾害预警提供科学依据。[方法] 收集了 2013—2021 年研究区 348 个雨量站的逐小时降雨数据和 231 处近 10 a 已发生灾情、险情滑坡事件的时间及位置, 基于平均降雨强度(I)—降雨历时(D)模型, 分地貌单元, 提出了不同降雨历时的临界降雨预警阈值和分级预警阈值。[结果] 研究区丘陵地貌区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的红色预警阈值依次为 29.774, 18.579, 14.416, 11.186, 8.679 和 6.734 mm; 低山地貌区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的红色预警阈值依次为 28.849, 15.542, 10.520, 7.121, 4.820 和 3.263 mm。[结论] 在 24 h 前期降雨条件下, 低山区对降雨的敏感性明显比丘陵区高, 具体表现为低山区 1, 3, 6, 12 和 24 h 的临界预警阈值明显比丘陵区更低, 但随着降雨历时进一步延长, 低山区和丘陵区临界预警阈值趋于相近。

关键词: 平均降雨强度; 降雨历时; 分级预警; 预警阈值; 红层丘陵低山区; 滑坡灾害

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0215-08

中图分类号: P642.23

文献参数: 易靖松, 程英建, 徐乙, 等. 基于过程降雨的红层丘陵低山区滑坡灾害气象预警阈值研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 215-222. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20241027.001; Yi Jingsong, Cheng Yingjian, Xu Yi, et al. Meteorological warning thresholds for regional landslide disasters in red bed hills at low mountain area based on process rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 215-222.

Meteorological Warning Thresholds for Regional Landslide Disasters in Red Bed Hills at Low Mountain Area Based on Process Rainfall

Yi Jingsong^{1,2}, Cheng Yingjian², Xu Yi³, Yin Guolong²

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2.Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu,

Sichuan 611734, China; 3.Sichuan Geophysical Survey Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: [Objective] The relationship between rainfall intensity of different durations and regional landslide disasters was studied, and the meteorological warning threshold of landslide disasters was determined in order to provide a scientific basis of geological disaster warnings for local administrative departments. [Methods] Hourly rainfall data from 348 rainfall stations in the study area during 2013—2021 were collected, as well as the time and location of 231 disaster and dangerous landslide events that have occurred in the past 10 years. Based on the average rainfall intensity (I)—rainfall duration (D) model, the dataset was divided into geomorphic units. Critical rainfall warning thresholds were proposed, and graded warning thresholds for different rainfall durations were determined. [Results] Red warning thresholds for the average rainfall intensity at 1, 3, 6, 12, 24, and 48 hours under different early rainfall conditions in the hilly terrain area of the study area were 29.774, 18.579, 14.416, 11.186, 8.679 and 6.734 mm, respectively. The red

收稿日期: 2023-08-02

修回日期: 2023-10-12

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“库区劣化带生态防治技术示范”(DD20230452)

第一作者: 易靖松(1991—), 男(汉族), 四川省广安市人, 工程师, 硕士, 主要从事地质灾害调查与评价方面的研究。Email: 991591136@qq.com。

通信作者: 程英建(1989—), 男(汉族), 四川省自贡市人, 工程师, 硕士, 主要从事地质灾害机理与防治设计方面的研究。Email: 330239021@qq.com。

warning thresholds for the average rainfall intensity at 1, 3, 6, 12, 24 and 48 hours under different early rainfall conditions in low mountain terrain areas were 28.849, 15.542, 10.520, 7.121, 4.820 and 3.263 mm, respectively. [Conclusion] Under the condition of rainfall in the early 24 hours period, the sensitivity of low mountainous areas to rainfall was significantly higher than the sensitivity of hilly areas. The critical warning thresholds at 1, 3, 6, 12 and 24 hours in low mountainous areas were significantly lower than those in hilly areas. However, with the further extension of rainfall duration, the critical warning thresholds at low mountainous areas and hilly areas tended to be similar.

Keywords: average rainfall intensity; rainfall duration; graded warning; warning threshold; red bed hills at low mountam; landslide disaster

降雨与滑坡灾害关系密切,是滑坡地质灾害的主要诱发因素。大量调查研究发现,90%左右的地质灾害发生在降雨期间或降雨之后,基于降雨事件与地质灾害间的关联性,通过区域降雨特征来开展大范围区域地质灾害的预测预报,是有效预防降雨型滑坡灾害的重要途径^[1-2]。围绕降雨诱发区域性地质灾害气象预警阈值研究,国内外诸多学者开展了大量研究。例如,Thomas Glade等^[3]采用统计方法研究得出降雨诱发、非降雨诱发这两种情况下滑坡发生的降雨量阈值。Guzzetti等^[4]应用贝叶斯统计方法从大量数据中分析得出阈值曲线,发现山区的有效降雨强度要低于以地中海气候为特征的地区。国内方面,殷坤龙等^[5]以浙江省为研究区,采用统计学方法分析了台风、非台风两种情况下滑坡与降雨强度、降雨量的相关性,得到了诱发滑坡发生的降雨阈值曲线及临界值。张珍等^[6]、林孝松等^[7]从降雨量、降雨周期、暴雨频次、雨型以及降雨持续时间等方面进行了研究,指出了降雨与滑坡事件间的耦合。谢守益等^[8]、李晓等^[9]、谢剑明等^[10]研究确定了区域性滑坡发生的临界降雨量值及降雨诱发滑坡发生的概率等,为地方气象部门滑坡预警提供了重要依据。

前人对降雨强度—持续时间(*I—D*)模型的研究多将逐日降雨量转换为有效降雨量开展分析,通过实时雨量监测直接应用于区域滑坡灾害预测,尚未考虑不同地貌单元孕育滑坡灾害对降雨量敏感性的差异。为此,本文基于该模型,选取四川省南充市市域为研究区,利用获取的2013—2021年逐小时降雨数据,分地貌单元对研究区已发生的灾情、险情事件的降雨数据进行配套,对研究区滑坡灾害的气象预警阈值开展研究。

1 研究区地质背景及地质灾害概况

1.1 地质背景概况

研究区位于四川盆地东部,地势从北向南倾斜。地貌类型分为北部低山区和南部丘陵区两大类。研究区内低山区广泛分布,由侏罗系蓬莱镇组下段和遂宁组砂、泥岩组成,主要分布在研究区的中部和北部。丘陵区主要分布在研究区东南角的沿江地段,出露岩性为遂宁组砂、泥岩。研究区构造以宽缓褶皱为主,岩层产状平缓,倾角多小于10°,以近水平为主。气候属于亚热带季风性湿润气候,全年湿润,夏季多暴雨。

宁组砂、泥岩组成,主要分布在研究区的中部和北部。丘陵区主要分布在研究区东南角的沿江地段,出露岩性为遂宁组砂、泥岩。研究区构造以宽缓褶皱为主,岩层产状平缓,倾角多小于10°,以近水平为主。气候属于亚热带季风性湿润气候,全年湿润,夏季多暴雨。

1.2 滑坡灾害发育特征

通过资料收集,滑坡是研究区内主要的地质灾害,共发育滑坡灾害1452处,规模类型以小型为主,大型滑坡灾害仅占3处,中型滑坡56处,小型滑坡1393处,分别占滑坡点总数的0.21%,3.86%,95.95%,无巨型滑坡(图1)。区内滑坡均为土质滑坡,物质来源于斜坡岩体风化残坡积堆积物,一般土石比较低,以粉质黏土为主,碎石含量一般小于15%,结构松散一稍密,一般沿土岩接触面滑移,少数也会牵动浅层基岩,其破坏规模多为小型。根据研究区地质灾害首次发生或出现变形破坏迹象的时间统计,区内现有1452处滑坡灾害隐患点,发生在5—9月的1158处,占发生总数的79.75%,其中降雨量最大的8月灾点数量最多,达到410处。研究区地质灾害分布时间曲线与月平均降雨曲线具有较强的相关性(图2)。

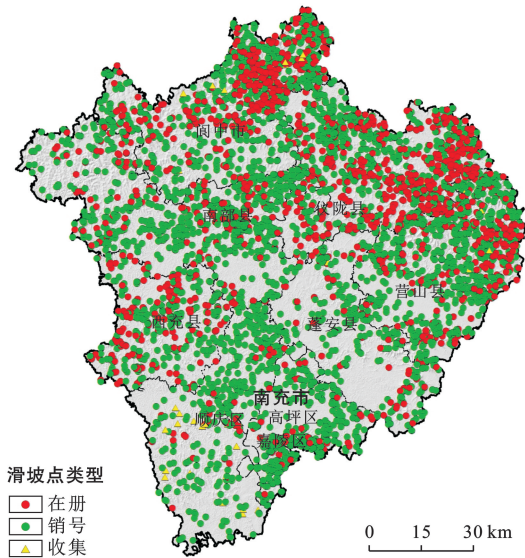


图 1 研究区地质灾害分布图
Fig.1 Geological hazard distribution map of study area

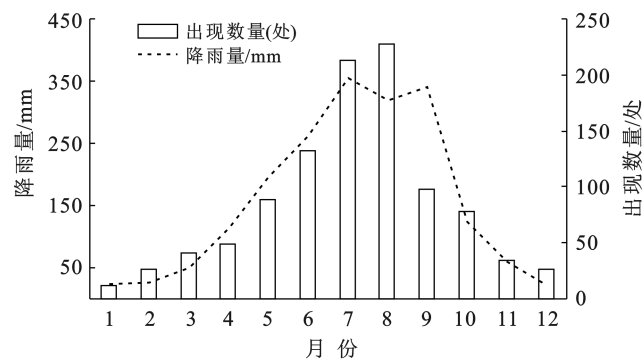


图 2 研究区地质灾害与降雨的关系

Fig.2 Relationship between geological hazards and rainfall in study area

1.3 降雨诱发滑坡形成机理

研究区滑坡灾害的发生与降雨历时、降雨量等有密切的正相关关系,在强降雨过程中滑坡灾害与降雨具有同步发生的特点,在降雨强度不大但连续降雨过程中,部分地质灾害具有一定的滞后效应,局地暴雨型降雨诱发的地质灾害往往集中发生在暴雨过后。在强降雨过程中,临空面较好的残坡积土石混合体自重增大,地下水位逐渐升高,土体内部发生缓慢的蠕滑变形,形成裂缝,随着降雨继续入渗,坡体快速饱和,裂缝增多增大,后缘逐渐形成明显的拉裂缝,为地表水入渗提供了良好通道,进一步加剧土体内部的软化效应,随着裂缝逐渐贯通,地下水位继续升高,表层坡体沿着基覆界面发生滑动。该类滑坡滑体厚度较薄,一般为 3~5 m,破坏规模一般为小型。由此可见,降雨对研究区滑坡的孕育启动具有至关重要的作用,降雨量的大小通过入渗直接影响着坡体的应力状态。当降雨强度达到一定的临界值,坡体内部应力逐渐达到极限平衡状态,进而发生失稳,造成人员伤亡和经济损失。因此,建立研究区降雨预警阈值模型对区内滑坡灾害的防控具有重要意义。

2 数据来源

2.1 降雨数据

研究区地形地貌分为丘陵区 and 低山区。丘体在长期的流水和嘉陵江干支流的作用下,结构较松散破碎,大小不等。为研究地质灾害发生与降雨的关系,提出准确可靠的气象阈值建议,在研究区气象局获取了区内 348 个雨量站近 10 a(2013—2021 年)逐时的降雨数据,气象站详细分布位置如图 3 所示。从图 3 分布位置可以看出,获取雨量站数据分布位置几乎覆盖了研究区各个区域,这也为获取灾害发生时的过程雨量数据提供了可靠的保障。

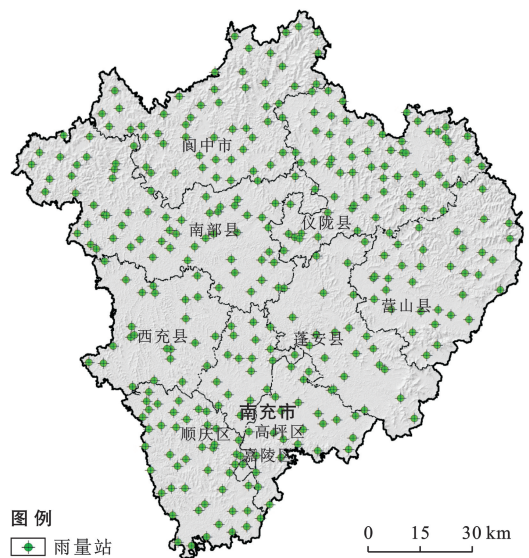


图 3 研究区雨量站分布位置

Fig.3 Location of rainfall stations in study area

2.2 灾害事件数据

通过资料收集,获取了研究区 2014—2021 年已造成一定程度损失的灾情及险情数据,共计 231 处灾情、险情,数据包括的灾情、险情的发生时间、地点、规模及造成的损失程度等详细的编录信息,能够有效的匹配灾害发生时的过程降雨数据,为气象预警阈值的研究打下了坚实的基础。

3 数据处理

3.1 降雨事件的界定标准

通过对研究区的降雨数据分析,降雨雨型主要可以分为两种,一种为短历时高强度的局地暴雨,另一种为降雨强度相对较小的持续性的降雨,当然也包括两者结合的持续性强降雨雨型。对于持续性降雨雨型,存在一个降雨间断几小时又接着降雨的情况,这就导致在统计降雨历时和强度的过程中,不容易界定降雨事件的历时。因此,结合研究区的降雨特征和相关文献的查阅^[11-13],本次数据统计对一次降雨事件的界定,统一采用间隔 6 h 累积降雨量不超过 3 mm 为界定是否是一次降雨事件的标准。如某一雨量站 24 h 的逐小时降雨量数据为 6:00 开始降雨,但雨量非常小;9:00—13:00 无降雨;14:00 又开始了持续性降雨。这类情况的降雨事件起始时间定义为 14:00,如果 6:00—12:00 的累积雨量超过了 3 mm,则降雨事件的起始时间界定为 6:00。按照上述降雨事件的界定标准,整理逐时降雨过程资料和收集的灾情、险情信息,根据灾情、险情的发生时间,提取每一处灾害诱发的降雨事件特征,得到每一处灾害诱发降雨事件的平均降雨强度(I)、降雨历时(D)和过程累积降雨量(E)。

3.2 噪点数据的剔除

在统计灾害诱发降雨事件的平均降雨强度(I)及降雨历时(D)过程中,通常可能会遇到以下几个方面原因形成的噪点数据;一是部分灾情、险情数据缺乏灾害发生的准确时间点。在根据灾害发生时间匹配降雨事件时,发现灾害发生时间前后几日均无降雨量。二是部分灾情、险情数据失真。在根据灾害发生时间匹配降雨事件时,发现灾害发生时间降雨量非常小,降雨历时也非常短,仅有 2~3 h 的 0.2~0.5 mm/h 的降雨历时和强度。

受以上几类影响的数据统称为噪点数据,在数据统计分析过程中,进行了删除处理。删除噪点数据后,剩余有效数据为 128 处。

3.3 数据统计

对收集的 231 处灾情、险情进行降雨事件的统计分析。根据灾情、险情的发生时间,提取每一处灾害诱发的降雨事件特征,删除噪点数据后,得到 128 处灾情、险情降雨事件,包括平均降雨强度 I (mm/h)、降雨历时 D (h)、累计雨量 E (mm)等特征数据,详细数据见下表(表 1),为下一步模型拟合做好数据准备。

表 1 研究区灾情事件与降雨量关系
Table 1 Relationship between disaster events and rainfall in study area

灾害 编号	发生日期	发生 时间	I / (mm·h ⁻¹)	D / h	E / mm	灾害 编号	发生日期	发生 时间	I / (mm·h ⁻¹)	D / h	E / mm
Z ₀₁	20140912	3:20	1.85	4	7.4	Z ₆₅	20190723	8:00	3.39	16	54.24
Z ₀₂	20140912	5:30	3.45	2	6.9	Z ₆₆	20190724	6:00	7.72	5	38.6
Z ₀₃	20140912	6:45	2.37	3	7.11	Z ₆₇	20190724	5:00	6.72	4	26.88
Z ₀₄	20140912	5:34	3.45	2	6.9	Z ₆₈	20210626	9:00	4.46	5	22.3
Z ₀₅	20140912	4:30	1.85	4	7.4	Z ₆₉	20210701	6:42	14.2	3	42.6
Z ₀₆	20140912	5:20	5.6	1	5.6	Z ₇₀	20210706	5:00	11.08	5	55.4
Z ₀₇	20140912	3:20	1.85	3	5.55	Z ₇₁	20210710	4:18	2.87	11	31.57
Z ₀₈	20140912	5:20	5.6	1	5.6	Z ₇₂	20210710	5:24	4.26	9	38.34
Z ₀₉	20140912	5:20	5.6	1	5.6	Z ₇₃	20210710	4:33	4.28	8	34.24
Z ₁₀	20140912	3:50	2.94	52	152.88	Z ₇₄	20210710	6:41	4.14	10	41.4
Z ₁₁	20140912	16:37	7.18	7	50.26	Z ₇₅	20210710	6:11	4.12	9.5	39.14
Z ₁₂	20140912	11:10	1.1	2	2.2	Z ₇₆	20210710	4:50	4.27	8.3	35.441
Z ₁₃	20140912	14:10	14.9	3	44.7	Z ₇₇	20210710	5:38	3.67	26	95.42
Z ₁₄	20140912	17:20	6.28	8	50.24	Z ₇₈	20210710	4:04	1.54	10	15.4
Z ₁₅	20140913	16:50	3.76	18	67.68	Z ₇₉	20210710	6:32	2.19	12.5	27.375
Z ₁₆	20140914	11:10	2.56	31	79.36	Z ₈₀	20210710	20:10	3.18	32	101.76
Z ₁₇	20140912	14:30	9.32	5	46.6	Z ₈₁	20210710	5:30	3.01	10	30.1
Z ₁₈	20140912	11:00	1.2	1.8	2.16	Z ₈₂	20210710	7:20	3.51	12	42.12
Z ₁₉	20140912	11:30	1.2	2.4	2.88	Z ₈₃	20210710	9:10	2.59	23	59.57
Z ₂₀	20140912	11:50	1.2	2.8	3.36	Z ₈₄	20210710	19:30	5.58	33	184.14
Z ₂₁	20140912	15:40	8.31	6	49.86	Z ₈₅	20210710	17:00	6.01	30.5	183.305
Z ₂₂	20140913	10:20	5.08	11	55.88	Z ₈₆	20210711	5:00	3.92	49	192.08
Z ₂₃	20140912	17:20	5.58	9	50.22	Z ₈₇	20210711	13:20	5.02	5	25.1
Z ₂₄	20140912	16:00	6.23	8	49.84	Z ₈₈	20210711	8:20	2.91	13	37.83
Z ₂₅	20140912	14:05	4.57	4	18.28	Z ₈₉	20210711	14:00	4.25	6	25.5
Z ₂₆	20140912	13:27	5.5	3	16.5	Z ₉₀	20210710	12:00	6.72	26	174.72
Z ₂₇	20140917	5:20	1.44	11	15.84	Z ₉₁	20210712	10:30	2.48	12	29.76
Z ₂₈	20140917	2:01	0.83	8	6.64	Z ₉₂	20210712	10:17	4.97	12	59.64
Z ₂₉	20140917	4:22	1.47	10	14.7	Z ₉₃	20210712	9:28	4.68	11	51.48
Z ₃₀	20140917	3:33	0.91	9	8.19	Z ₉₄	20210715	7:15	1.75	4	7
Z ₃₁	20140917	1:34	0.78	7	5.46	Z ₉₅	20210716	19:30	4.28	13	55.64
Z ₃₂	20140917	5:35	1.45	11	15.95	Z ₉₆	20210715	15:30	8.56	5	42.8
Z ₃₃	20140917	3:40	0.92	9	8.28	Z ₉₇	20210714	11:30	3.55	8	28.4
Z ₃₄	20140918	7:20	1.964	25	49.1	Z ₉₈	20210711	9:30	2.87	34	97.58
Z ₃₅	20140918	3:25	1.83	21	38.43	Z ₉₉	20210716	19:30	5.78	16	92.48
Z ₃₆	20140918	4:46	1.99	22	43.78	Z ₁₀₀	20210717	12:16	4.1	5	20.5
Z ₃₇	20140918	3:33	1.84	21	38.64	Z ₁₀₁	20210717	12:41	4.1	5	20.5

续表 1 (Continued table 1)

灾害 编号	发生日期	发生 时间	$I/$ (mm · h ⁻¹)	$D/$ h	$E/$ mm	灾害 编号	发生日期	发生 时间	$I/$ (mm · h ⁻¹)	$D/$ h	$E/$ mm
Z ₃₈	20140918	1:34	1.73	19	32.87	Z ₁₀₂	20210717	13:00	3.41	6	20.46
Z ₃₉	20140918	3:10	1.79	20.7	37.053	Z ₁₀₃	20210719	7:45	3.66	3	10.98
Z ₄₀	20140919	5:30	1.33	19	25.27	Z ₁₀₄	20210726	18:20	27.4	1	27.4
Z ₄₁	20140919	6:45	1.28	20	25.6	Z ₁₀₅	20210807	23:00	19.98	9	179.82
Z ₄₂	20140919	5:34	1.33	19	25.27	Z ₁₀₆	20210807	1:00	21.23	11	233.53
Z ₄₃	20140919	4:30	1.37	18	24.66	Z ₁₀₇	20210807	1:00	21.23	11	233.53
Z ₄₄	20140919	5:20	1.33	19	25.27	Z ₁₀₈	20210807	10:10	18.32	20	366.4
Z ₄₅	20140919	3:20	1.49	17	25.33	Z ₁₀₉	20210807	13:00	17.46	23	401.58
Z ₄₆	20140919	5:20	1.33	19	25.27	Z ₁₁₀	20210807	14:30	16.58	24.5	406.21
Z ₄₇	20140919	5:20	1.33	19	25.27	Z ₁₁₁	20210810	1:00	11.33	4	45.32
Z ₄₈	20140919	3:50	1.49	17	25.33	Z ₁₁₂	20210822	10:42	14.28	9	128.52
Z ₄₉	20140919	4:10	1.37	18	24.66	Z ₁₁₃	20210822	11:42	14.21	10	142.1
Z ₅₀	20140919	7:00	1.23	21	25.83	Z ₁₁₄	20210822	15:15	13.29	14	186.06
Z ₅₁	20150624	4:18	1.34	32	42.88	Z ₁₁₅	20210823	9:00	8.98	29	260.42
Z ₅₂	20180618	5:24	1.69	51	86.19	Z ₁₁₆	20210823	9:15	5.75	29	166.75
Z ₅₃	20180528	7:20	4.47	11	49.17	Z ₁₁₇	20210823	10:00	5.56	30	166.8
Z ₅₄	20180731	9:10	2.01	32	64.32	Z ₁₁₈	20210823	7:00	6.17	27	166.59
Z ₅₅	20180904	19:30	4.2	2	8.4	Z ₁₁₉	20210823	8:00	9.86	29	285.94
Z ₅₆	20180611	17:00	0.6	2	1.2	Z ₁₂₀	20210829	7:00	2.79	30	83.7
Z ₅₇	20190508	16:20	0.87	65	56.55	Z ₁₂₁	20210904	8:00	3.09	7	21.63
Z ₅₈	20190508	18:40	0.84	67	56.28	Z ₁₂₂	20210905	10:00	3.25	8	26
Z ₅₉	20190621	21:40	16.95	7	118.65	Z ₁₂₃	20210905	14:30	2.64	36	95.04
Z ₆₀	20190718	8:50	17.66	3	52.98	Z ₁₂₄	20210906	17:10	1.82	9	16.38
Z ₆₁	20190729	8:30	2.74	38	104.12	Z ₁₂₅	20210905	10:00	5.8	8	46.4
Z ₆₂	20190719	0:00	3.59	18	64.62	Z ₁₂₆	20210906	6:30	4.08	7	28.56
Z ₆₃	20190719	18:00	0.95	15	14.25	Z ₁₂₇	20210916	13:05	7.32	14	102.48
Z ₆₄	20190723	7:50	9.05	6	54.3	Z ₁₂₈	20210928	6:00	10.21	10	102.1

注: I 为降雨强度; D 为降雨历时; E 为累计雨量。

4 基于 $I—D$ 模型的预警阈值建议

4.1 预警分区

不同地貌类型区发育地质灾害对降雨强度和降雨历时的敏感程度也不一样,因此,为使得预警的模型和提出的阈值建议更具有适用性,本次模型建立采用分区建立的形式。预警分区主要结合研究区地形地貌特征进行分区,主要分为丘陵区 and 低山区,不同地貌类型的模型,采用该地貌类型的数据进行拟合建立模型。在前文获取的 128 处样本数据中,有 79 处是位于低山区,49 处位于丘陵区,预警分区图如图 4 所示。

4.2 模型建立

4.2.1 样本抽取 为进一步确定预警模型的准确性,在 128 处灾情、险情数据中,在低山区和丘陵区分别选取 2/3 来拟合模型,并留下 1/3 的数据来对模型进行论证。抽样采用分层随机抽样的方式,即将灾险情数据按年度分层,在每年度的灾险情事件中随机抽取 2/3 来拟合模型,每年度的剩余的下 1/3 的灾险情数据用于模型验证数据集。按照上述样本抽取方法,丘

陵区随机累计选取 33 处用于模型建立,16 处用于模型验证,低山区随机选取 54 处用于模型建立,25 处用于模型验证,样本抽取情况见(表 2)。

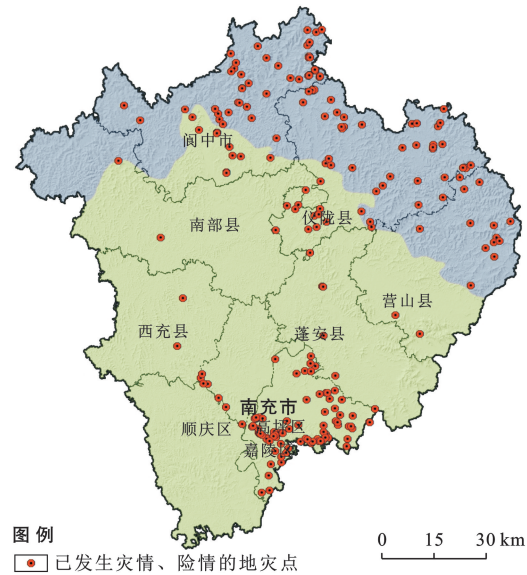


图 4 研究区滑坡灾害预警分区
Fig.4 Warning zoning map of landslide harzard at study area

表 2 模型验证样本抽取情况统计结果

Table 2 Statistical results of sample extraction for model verification						
地貌分区	样本类型	样本数量(处)				
		2014 年	2019 年	2021 年	其余年份	合计
丘陵区	建立样本	10	6	14	3	33
	检验样本	5	3	7	1	16
低山区	建立样本	23	1	27	3	54
	检验样本	11	1	12	1	25

4.2.2 模型建立

(1) 丘陵区。丘陵区地貌相对平缓,以地质灾害低易发、中易发区为主。本次统计区内灾情降雨事件 33 处,将平均降雨强度 I (mm/h)、降雨历时 D (h) 分别展布至双对数坐标纸上,历时为横坐标,降雨强度为纵坐标,得到图 5 上的散点,每个散点代表一次地质灾害发生的降雨事件样本。对坐标区域内样本散点进行拟合,得到拟合方程:

$$I=13.374 D^{-0.563} \quad (R^2=0.841\ 3) \quad (1)$$

式中: I 为平均降雨强度(mm/h); D 为降雨历时(h)。

(2) 低山区。低山区内地质灾害发育数量较多,也是研究区内主要的高易发区和中易发区。低山区内灾情降雨事件 54 处,将平均降雨强度 I (mm/h)、降雨历时 D (h) 分别展布至双对数坐标纸上,得到图 6 上的散点,对坐标区域内样本散点进行拟合,得到拟合方程:

$$I=6.196 D^{-0.366} \quad (R^2=0.862\ 1) \quad (2)$$

表 3 研究区地质灾害临界降雨阈值建议

临界降雨阈值	不同降雨历时(D)的地质灾害临界降雨阈值					
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h
丘陵区临界平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)	13.374	7.954	4.965	3.384	2.307	1.572
低山区临界平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)	6.196	4.145	3.216	2.495	1.936	1.502

4.3.2 分级预警降雨阈值建议 根据《地质灾害监测预警技术指南》,地质灾害气象风险预警等级由弱到强依次划分为 4 级、3 级、2 级、1 级。4 级预警(蓝色预警),表示预警区内气象因素致地质灾害发生有一定风险; 3 级预警(黄色预警),表示预警区内气象因素致地质灾害发生的风险较高; 2 级预警(橙色预警),表示预警区内气象因素致地质灾害发生的风险高; 一级预警(红色预警),表示预警区内气象因素致地质灾害发生的风险很高。结合前文拟合的 $I-D$ 模型,根据灾害 $I-D$ 曲线包络的灾害数量占比确定分级预警的 $I-D$ 模型,再根据模型代入降雨历时,

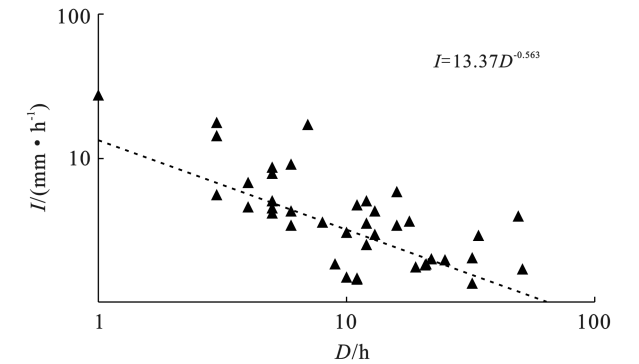


图 5 丘陵区降雨强度(I)与降雨历时(D)的拟合曲线
Fig.5 Fitting curve bettween rainfall intensity (I) and its duration (D) in hilly areas

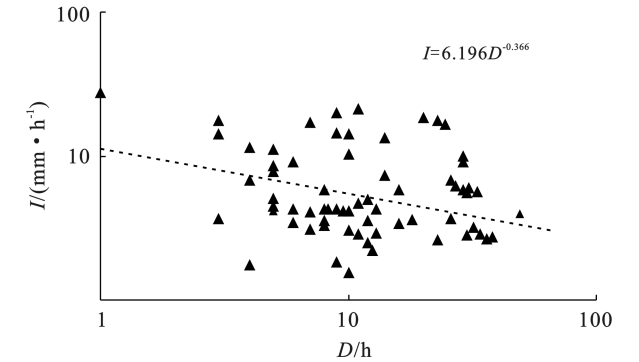


图 6 低山区降雨强度(I)与降雨历时(D)的拟合曲线
Fig.6 Fitting curve bettween rainfall intensity (I) and its duration (D) in low mountainous areas

4.3 气象预警阈值建议

4.3.1 临界降雨阈值建议 根据得到的拟合方程〔公式(1)—(2)〕,计算不同前期降雨条件下 1,3,6,12,24 和 48 h 的临界降雨阈值,计算结果详见表 3。

分别计算出 1,3,6,12,24 和 48 h 的分级预警降雨强度。采用包络灾害发生数量超过 80% 的 $I-D$ 曲线为红色预警的阈值范围,50%~80% 的 $I-D$ 曲线为橙色预警的阈值范围,30%~50% 的 $I-D$ 曲线为黄色预警的阈值范围,小于 30% 的 $I-D$ 曲线为蓝色预警的阈值范围。按照上述原则,得到丘陵区 and 低山区预警分级预警 $I-D$ 模型如图 7—8 所示。

得到低山区和丘陵区的分级预警模型后,将 1,3,6,12,24 和 48 h 分布代入分级预警模型,得到分级预警降雨强度阈值。整理得到研究区地质灾害气象分级预警阈值取值建议表(表 4)。

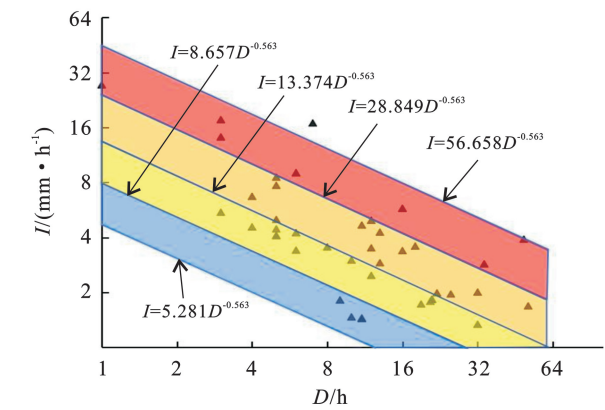


图 7 丘陵区地质灾害分级预警降雨阈值模型

Fig.7 Rainfall threshold model for geological hazard classification and warning in hilly areas

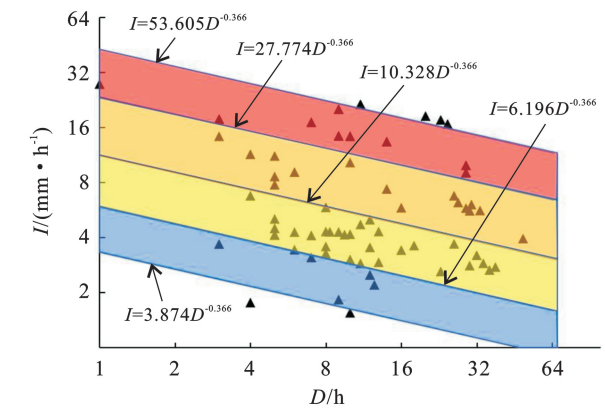


图 8 低山区地质灾害分级预警降雨阈值模型

Fig.8 Rainfall threshold model for grading and warning of geological hazards in low mountain areas

表 4 研究区不同历史降雨分级预警阈值建议

Table 4 Suggested thresholds for different historical rainfall classification warning in study area

预警分级		降雨历时/h					
		1	3	6	12	24	48
丘陵区平均降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	红色(一级)	[28.849,+∞)	[15.542,+∞)	[10.520,+∞)	[7.121,+∞)	[4.820,+∞)	[3.263,+∞)
	橙色(二级)	[13.374,28.849)	[7.205,15.542)	[4.877,10.520)	[3.301,7.121)	[2.235,4.820)	[1.513,3.263)
	黄色(三级)	[8.657,13.374)	[4.664,7.205)	[3.157,4.877)	[2.137,3.301)	[1.446,2.235)	[0.979,1.513)
	蓝色(四级)	[5.281,8.657)	[2.845,4.664)	[1.926,3.157)	[1.304,2.137)	[0.882,1.446)	[0.597,0.979)
低山区平均降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	红色(一级)	[27.774,+∞)	[18.579,+∞)	[14.416,+∞)	[11.186,+∞)	[8.679,+∞)	[6.734,+∞)
	橙色(二级)	[10.328,27.774)	[6.909,18.579)	[5.361,14.416)	[4.159,11.186)	[3.227,8.679)	[2.504,6.734)
	黄色(三级)	[6.196,10.328)	[4.145,6.909)	[3.216,5.361)	[2.495,4.159)	[1.936,3.227)	[1.502,2.504)
	蓝色(四级)	[3.875,6.196)	[2.591,4.145)	[2.011,3.216)	[1.560,2.495)	[1.211,1.936)	[0.939,1.502)

4.4 模型验证

将丘陵区其余 16 处灾情事件和低山区 25 处灾情事件的 I, D 值代入模型(图 9—10)。

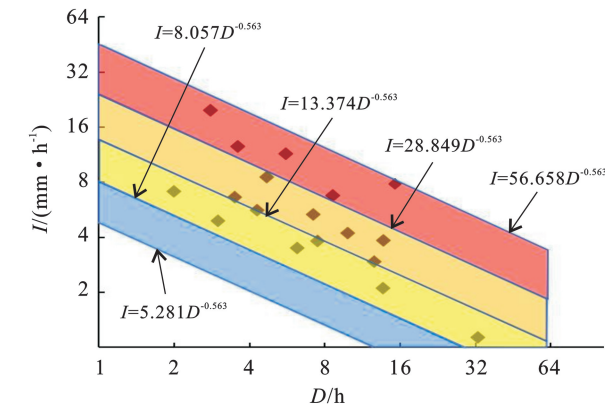


图 9 丘陵区灾害预警模型验证情况

Fig.9 Verification of harzard warning model at hilly region

结果表明,丘陵区 100%的灾情点包络在红色预警阈值范围内,75%的灾情点包络在橙色预警阈值范围内,31%的灾情点包络在黄色预警阈值范围内。低山区 96%的灾情点的包络在红色预警阈值范围内,76%的灾情点包络在橙色预警阈值范围内,17%的灾害点包络在黄色预警阈值范围内。验证结果表明,41 处验证灾情的 I, D 数据,仅在低山区有 1 处灾情事件未在预警阈值范围内,整体预测准确率达 97.5%,模型较准确。

5 预警阈值分析

在获取研究区低山区和丘陵区各级预警阈值后,将低山区和丘陵区的 1,3,6,12,24 和 48 h 平均雨强的临界预警阈值对比分析(图 11),在 24 h 前期降雨条件下,低山区对降雨的敏感性明显比丘陵区高,具

体表现为低山区 1, 3, 6, 12 和 24 h 的临界预警阈值明显比丘陵区更低, 但随着降雨历时进一步延长, 低山区和丘陵区域临界预警阈值趋于相近。这也与研究区的孕灾背景有一定关系, 研究区低山区的滑坡易发程度明显比丘陵区更高, 对降雨的敏感程度也就更高, 启动所需降雨量也就比丘陵区小。而长历时的降雨条件下, 丘陵区和低山区的坡体均处于极度饱水状态, 坡体内部的岩土体都经历过长时间的软化, 力学参数都急剧降低, 启动所需的降雨量也就比较相近。

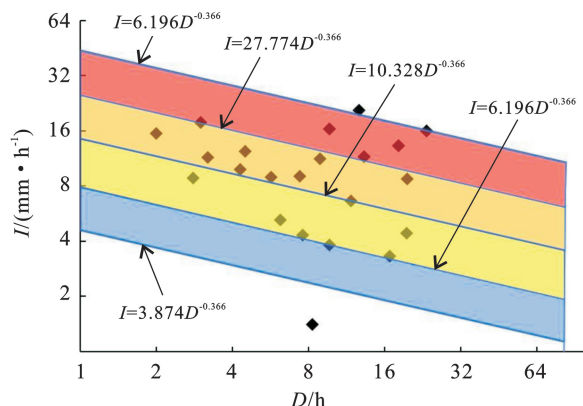


图 10 低山区灾害预警模型验证情况

Fig.10 Verification of harazard warning low mountainous areas

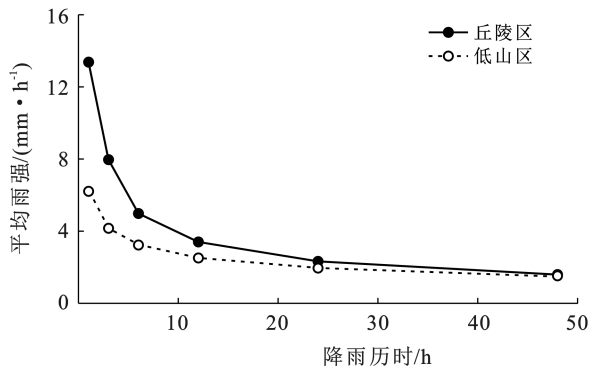


图 11 不同前期降雨条件下的滑坡灾害临界预警阈值

Fig.11 Critical warning threshold of landslide harazard under different early rainfall conditions

6 结论

(1) 研究区滑坡灾害频发, 以中小型土质滑坡为主, 发育密度高。

(2) 降雨为研究区滑坡灾害的主要诱发因素, 研究区降雨 80% 集中在 5—9 月, 滑坡灾害发生也集中在该时间段。

(3) 研究区丘陵地区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的临界预警阈值依次为 13.374, 7.954, 4.965, 3.384, 2.307 和 1.572 mm; 研究区低山区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的临界预警阈值为 6.196, 4.145, 3.216,

2.495, 1.936 和 1.502 mm。

(4) 研究区丘陵地区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的红色预警阈值依次为 29.774, 18.579, 14.416, 11.186, 8.679 和 6.734 mm; 研究区低山区不同前期降雨条件下 1, 3, 6, 12, 24 和 48 h 平均雨强的红色预警阈值依次为 28.849, 15.542, 10.520, 7.121, 4.820 和 3.263 mm。

(5) 在 24 h 前期降雨条件下, 低山区对降雨的敏感性明显比丘陵区高, 具体表现为低山区 1, 3, 6, 12 和 24 h 的临界预警阈值明显比丘陵区更低, 但随着降雨历时进一步延长, 低山区和丘陵区域临界预警阈值趋于相近。

参考文献 (References)

- [1] 李子豪, 王钧, 郭婷婷, 等. 基于降雨强度-历时的安徽省黄山市滑坡分组阈值研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 184-190.
Li Zihao, Wang Jun, Guo Tingting et al. Landslide classification threshold in Huangshan City of Anhui Province based on rainfall intensity-duration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 184-190.
- [2] 贺可强, 陈为公, 张朋. 蠕滑型边坡动态稳定性系数实时监测及其位移预警判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1377-1385.
He Keqiang, Chen Weigong, Zhang Peng. Real-time monitoring of dynamic stability coefficient and displacement criterion of the creep slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1377-1385.
- [3] Glade T, Crozier M, Smith P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "antecedent daily rainfall model" [J]. Pure & Applied Geophysics, 2000, 157(6/7/8): 1059-1079.
- [4] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe [J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2007, 98(3/4): 239-267.
- [5] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1061-1066.
Liu Liling, Yin Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066.
- [6] 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.

(下转第 235 页)

[22] 彭亮,杜文学,田浩.西宁市特大滑坡监测预警示范[J]. 科学技术与工程,2021,21(18):7806-7813.
Peng Liang, Du Wenxue, Tian Hao. Monitoring and early warning demonstration of huge landslide in Xining City [J]. Science Technology and Engineering, 2021,21 (18):7806-7813.

[23] 费康,彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.
Fei Kang, Peng Jie. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2017.

[24] 杨玲.青海省西宁市南川东路滑坡稳定性分析与研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Yang Ling. Analysis and research on East Road landslide stability of the Nanchuan in Xining City, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2014.

[25] Mein G R, Larson L C. Modelling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9 (2):384-393.

[26] 中国国家标准化管理委员会.滑坡防治工程勘察规范: GB/T32864—2016.[S].北京:中国标准出版社,2016.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for Geological Investigator of Landslide Prevention: GB/T 32864—2016. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[27] 王占巍,赵发睿,谢文萃,等.青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价[J].水土保持通报,2020,40 (3):81-87.
Wang Zhanwei, Zhao Farui, Xie Wenping, et al. Formation condition analysis and stability evaluation of Gaojiawan landslide in Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):81-87.

[28] 任东兴,薛鹏,叶飞,等.降雨入渗条件下黏性土基坑浅层边坡稳定性分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(2):204-212.
Ren Dongxing, Xue Peng, Ye Fei, et al. Shallow slope stability analysis of cohesive soil foundation pit under rainfall infiltration [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(2):204-212.

[29] 洪心怡,刘志强,胡春洋,等.降雨入渗条件下双层非饱和土边坡渐进性破坏数值分析[J].自然灾害学报, 2023,32(2):71-80.
Hong Xinyi, Liu Zhiqiang, Hu Chunyang, et al. Numerical analysis of progressive failure of double-layered unsaturated slope due to rainfall infiltration [J]. Journal of Natural Disasters, 2023,32(2):71-80.

~~~~~

(上接第 222 页)

[7] 林孝松,郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001,16(2):88-93.  
Lin Xiaosong, Guo Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2001,16(2):88-93.

[8] 谢守益,张年学,许兵.长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J].工程地质学报,1995,12(2):60-69.  
Xie Shouyi, Zhang Nianxue, Xu Bing. Probability analysis of precipitation-induced slide of typical landslides in Three Gorge area of the Yangtze River [J]. Journal of Engineering Geology, 1995,12(2):60-69.

[9] 李晓,张年学,廖秋林,等.库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报, 2004,23(21):3714-3720.  
Li Xiao, Zhang Nianxue, Liao Qiulin, et al. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(21):3714-3720.

[10] 谢剑明,刘礼领,殷坤龙,等.浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J].地质科技情报,2003,22(4):101-105.  
Xie Jianming, Liu Liling, Yin Kunlong, et. al. Study on the threshold valves of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2003,22(4):101-105.

[11] 张勇,温智,程英建.四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J].水文地质工程地质,2020,47(2):178-182.  
Zhang Yong, Wen Zhi, Cheng Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020,47(2):178-182.

[12] 李长江,麻土华,孙乐玲,等. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法[J].山地学报,2011,29 (1):81-86.  
Li Changjiang, Ma Tuhua, Sun Leling, et al. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast [J]. Journal of Mountain Science, 2011,29(1):81-86.

[13] 王小龙.前期降雨及雨型对土质高边坡稳定性影响分析[J].山西交通科技,2017(3):16-18.  
Wang Xiaolong. The analysis of the influence of antecedent rainfall and rainfall pattern on the stability of soil high slope [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2017(3):16-18.