

引用格式:周剑,汤明高,许强,吴辉隆,王新敏.重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J].山地学报,2022,40(6):847-858.

ZHOU Jian, TANG Minggao, XU Qiang, WU Huilong, WANG Xinmin. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold [J]. Mountain Research, 2022, 40(6):847-858.

重庆市滑坡降雨阈值预警模型

周剑¹, 汤明高^{1*}, 许强¹, 吴辉隆¹, 王新敏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, 成都 610059;

2. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401147)

摘要:重庆降雨型滑坡高发,是降雨型滑坡经验性降雨阈值和预报模型的研究热点地区,然而,经验性降雨阈值多存在地域局限性,不同类型的降雨阈值模型对重庆地区的适用性及精确度也有所不同。本文以重庆地区148个降雨型滑坡为研究对象,统计分析降雨特征,建立 $I-P$ 、 $I-D$ 以及 $I-E$ 三种降雨阈值模型,采用普通最小二乘回归法(OLSR)划分临界阈值曲线,对比分析选择最优降雨阈值模型作为重庆市滑坡预警判据。结果表明:重庆市滑坡主要发生在汛期5—9月,超过88.52%滑坡发生日均存在降雨;滑坡事件发生前1日降雨对滑坡的诱发作用最为明显,且距离滑坡发生时间越久,滑坡事件与降雨量的相关系数明显下降;三个降雨阈值模型进行了精度比较后,发现了降雨强度-降雨历时($I-D$)阈值模型更适用于重庆市降雨型滑坡监测预警。重庆降雨阈值模型能够为地方政府在滑坡预警方面提供科学依据和借鉴方法。

关键词:重庆地区;降雨型滑坡;阈值模型;监测预警

中图分类号: P642

文献标志码: A

降雨是滑坡灾害的重要诱因。研究表明^[1],90%以上的滑坡事件都与降雨极相关。统计分析滑坡类型与激发降雨量之间的关系,确定降雨型滑坡发生时的降雨阈值,可有效地预测滑坡发生的可能性,确定滑坡预警的区域及其等级。

滑坡降雨阈值模型的研究主要包括两种思路,一是基于物理模型及水文模型,确定滑坡降雨临界阈值^[2];二是基于历史滑坡信息以及降雨数据统计,得到经验性的降雨阈值^[3-4]。由于降雨诱发滑坡过程的复杂性,量化计算极其困难^[5],区域降雨型滑坡灾害预警方面多采用后者。对经验性降雨阈值模型的研究,国内外主要关注累积降雨量(E)、降

雨强度(I)和降雨历时(D)三者之间关系^[6]。国外较早地关注到降雨型滑坡经验性降雨阈值问题,首次提出滑坡临界累计降雨量的概念^[7];考虑到气候差异,采用降雨强度除以年降雨量的方法对降雨强度进行了标准化处理,建立了降雨阈值 $I-D$ 曲线^[8];经验性降雨阈值进一步细分可为4类^[9]:①降雨强度-降雨历时($I-D$)曲线;②基于累计降雨量的降雨阈值;③累计降雨量-降雨历时($E-D$)曲线;④累计降雨量-降雨强度($E-I$)曲线。国内同期开展了区域滑坡降雨阈值的研究,例如,浙江地区有效降雨量模型和滑坡的临界降雨量阈值^[10];云南华坪县诱发滑坡的降雨强度-历时($I-D$)阈值曲线和确定降雨历时

收稿日期(Received date):2022-9-15;改回日期(Accepted date):2022-12-26

基金项目(Foundation item):重庆市规划和自然资源局科技项目(TC209D058)。[Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources Science and Technology Project Funding(TC209D058)]

作者简介(Biography):周剑(1993-),男,博士研究生,主要研究方向:地质灾害机理、评价预测及防治。[ZHOU Jian(1993), male, Ph. D candidate, research on geological disaster mechanism, evaluation and prediction and prevention] E-mail:798294061@qq.com.

* 通讯作者(Corresponding author):汤明高(1978-),男,博士,教授,主要研究方向:地质灾害机理、评价预测及防治。[TANG Minggao(1978-), male, Ph. D, professor, research on geological disaster mechanism, evaluation and prediction and prevention] E-mail:tomyr2008@163.com.

D 结束时刻的方法^[11]。尽管国内外学者对降雨型滑坡的经验性降雨阈值模型进行了大量研究,但仍有不少不足之处,滑坡相应的降雨数据不够准确,且多数研究的降雨模型阈值存在地域的局限,导致阈值模型在工程应用上的会有所偏差。

重庆处于亚热带,降雨丰沛且集中、地形地貌种类较多、地层岩性组合复杂、区域内水系发育^[12-13],降雨型滑坡高发,是降雨型滑坡预报模型的研究热点地区^[14-16]。本文将采用最小二乘回归(OLSR)参数估计来划分临界降雨阈值曲线,研究 $I-P$ 、 $I-D$ 以及 $I-E$ 三种降雨阈值模型对于重庆市降雨型滑坡的适用性,以重庆市典型降雨型滑坡案例验证模型的精度,选择最优阈值模型作为重庆市降雨型滑坡预警判据。研究成果能够为政府部门在滑坡预警方面提供指导,有效降低滑坡的危害性。

1 研究区概况

重庆市坐落于四川盆地东部,西与四川交界,东与湖北接壤,南交贵州,北接陕西,下辖 38 个区

县、两江新区和万盛经开区。地理位置范围为 $105^{\circ}11' \sim 110^{\circ}11'E$, $28^{\circ}10' \sim 32^{\circ}13'N$ 。幅员面积约 $82\,402\text{ km}^2$ 。研究区东部连接秦巴山和武陵山,西部逐渐衔接到四川中部地区的丘陵地带。西部以低山丘陵居多,海拔高度 $500 \sim 900\text{ m}$ 。东部逐渐变为低山和中山,海拔 $1000 \sim 2500\text{ m}$ 。由于长江、嘉陵江、乌江及其支流的分割,导致其地形起伏较大,岩溶(石山)分布广泛。

重庆市属中亚热带季风气候,地层以砂、泥岩为主,是我国崩塌、滑坡等地质灾害最严重的城市之一^[16],重庆市地质灾害分布如图 1,其地质灾害类型主要以滑坡为主,每年发生的不同规模、类型的滑坡可达上百起,大多数滑坡为降雨型滑坡,主要由强降雨诱发,年降雨量为 $955.4 \sim 1519.1\text{ mm}$ 。降雨量从东南向西北、东北方向逐渐减少,东部山区降雨量大于西部山区,长江南岸降雨量大于长江北岸。重庆市 1951—2000 年平均降雨量为 1091.4 mm 。近年最大年降雨量为 1753.8 mm ,出现于 1999 年的秀山,最少年降雨量为 652.0 mm ,出现于 1997 年的巫溪,降雨量主要集中在 5—10 月,占年降雨量 70%

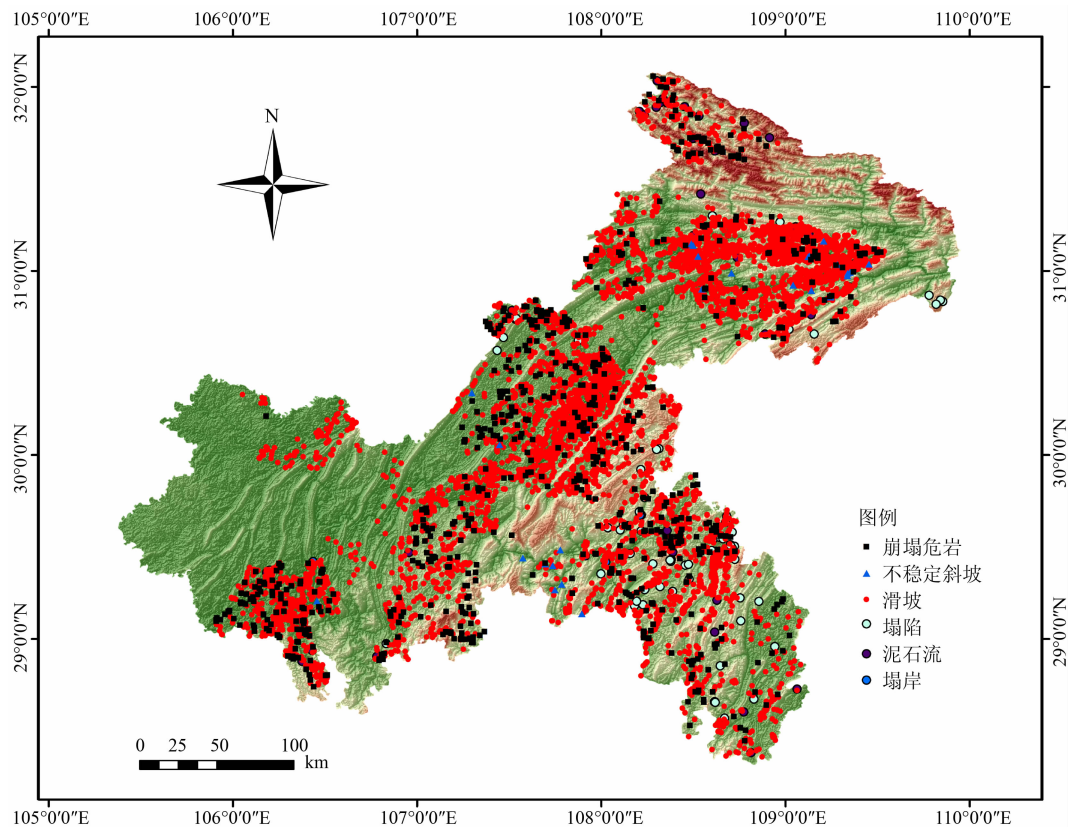


图 1 重庆市地质灾害分布

Fig. 1 Distribution of geological disasters in Chongqing

左右,近年日最大降雨量为 1996 年 7 月 14 日秀山,达 209.5 mm。

2 研究方法

2.1 滑坡降雨阈值模型

经验性降雨阈值获取方法是通过对诱发滑坡的历史降雨事件进行统计,结合单个或多个降雨参数确定降雨与滑坡的相关性^[17-18],如累积降雨量和降雨历时、降雨强度和降雨历时等^[19]。将这些诱发滑坡的历史降雨数据点以笛卡尔坐标、半对数坐标或双对数坐标进行绘制和表示,然后通过 MATLAB、origin 或 excel 等软件拟合这些数据点的百分水平下限,获得经验性下限降雨阈值,以此作为滑坡启动的降雨判据,这些阈值主要表达形式是以幂函数或线性回归方程来表示^[20]。

现阶段主流的经验性降雨关系阈值有三种(表 1),其中 $I-D$ 阈值也是经验性降雨阈值中研究最多、应用最广泛的一种。

表 1 经验性降雨关系阈值及表达式

Tab. 1 Empirical rainfall relationship threshold and expression

降雨关系阈值	表达式
累积降雨量-降雨历时(E-D)	$E = C + \alpha \times D^\beta$
累积降雨量-降雨强度(E-I)	$E = C + \alpha \times I^\beta$
降雨强度-降雨历时(I-D)	$I = C + \alpha \times D^\beta$

注: I 为诱发滑坡降雨事件降雨强度(mm/h),短历时取峰值降雨强度,长历时取平均值; D 为诱发滑坡的降雨事件历时(h); E 为累积降雨量(mm); α, β 均为统计参数; $C \geq 0$ 。

上述的降雨指标中,没有考虑前期有效降雨量这个指标,在多数降雨型滑坡事件中,前期降雨对其的影响是不可忽视的,前期降雨的入渗使得斜坡地下水位身高,增加岩土体的孔隙水压力和含水量,导致斜坡的稳定性降低,进而诱发滑坡事件。为了研究降雨阈值模型,首先要明确前期有效降雨量,前期有效降雨量是指滑坡发生前的降雨过程影响滑坡稳定性的降雨量。降雨过程的持续时间各不相同,且并非所有的降雨量都会进入岩土体内导致滑坡发生,在降雨过程中部分降雨通过地表径流和蒸发而流失,因此 Crozier^[21]引入有效降雨量来预测降雨诱发滑坡,以此来计算滑坡发生前 10 日的前期有效降雨量:

$$P = \sum_{i=1}^n K^i R_i \quad (1)$$

式中, P 为滑坡发生前 i 天累计有效降雨量(mm); R_i 为滑坡发生前 n 天的降雨量(mm); K 为降雨衰减系数,Crozier 根据研究区域的水径流量和蒸发速率,对 K 值取 0.84。

降雨衰减系数 K 的正确选择会使预警预报更加准确,已有部分学者通过对重庆市地质、气象和水文条件等方面进行分析,得到了重庆市前期降雨衰减系数 $K=0.6$ ^[22],因此可以推算得到重庆市滑坡事件前期有效降雨量。

2.2 最小二乘回归法

最小二乘回归法 OLSR 是应用较广的参数估计方法。OLSR 是估计回归系数的最基本方法,可描述自变量对于因变量的均值影响。OLSR 对于小降雨事件及台风天气带来的极端降雨条件进行弱化,更符合整体规律的分布趋势。其原理如下^[23-24]:

假设随机变量 Y 的分布函数为

$$F(y) = P(Y \leq y) \quad (2)$$

则 Y 的第 τ 分位数为

$$Q(\tau) = \inf\{y: F(y) \geq \tau\} \quad (3)$$

式中,中位数可以表示为 $Q(1/2)$,是特殊的分位数。对于 Y 的一组随机样本 $\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$,最小二乘法回归法的原理是使得残差平方和最小,即 $\min \sum (y_i - \xi)^2$ 为最优解。其中 y_i 为样本值, ξ 为估计值,任意的 $\tau \in (0, 1)$ 。

3 重庆市滑坡事件的降雨特征

3.1 前期有效降雨量特征

为了明确重庆市的降雨型滑坡事件的降雨特征,收集重庆市 4988 个滑坡降雨资料,统计分析得出重庆市滑坡主要发生在雨季汛期(5—9 月),所占比例为 84.56%,具体发生的月份概率如图 2 所示。可以看出,重庆市滑坡的发生与降雨密切相关。

下面选取 148 个具有完整降雨资料的降雨型滑坡事件进行统计,分析当日激发降雨量与前期有效降雨量的关系。

当日激发降雨强度对重庆市降雨型滑坡有一定的影响。马力^[25]等通过研究分析重庆市区域内 153 例降雨型滑坡后指出,重庆市山体滑坡 24 h 内的降雨量(即当日激发降雨强度)是诱发滑坡发生

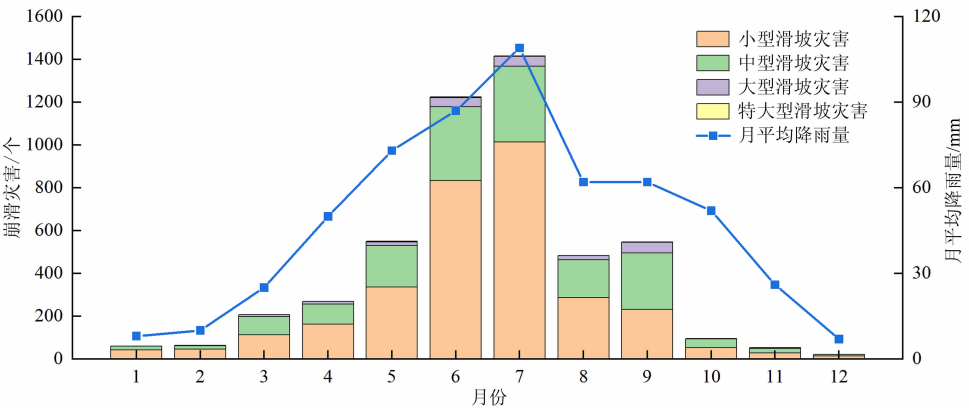


图 2 重庆市滑坡灾害与月均降雨量关系

Fig. 2 Relationship between landslide disaster and average monthly rainfall in Chongqing

的主要因子,当当日降雨量大于等于 25 mm 时, 87.8% 的滑坡会发生不同程度的变形。在统计分析 148 个具有明确降雨时间的滑坡数据,得出重庆市区域内滑坡数与当日激发降雨强度关系(表 2)。

表 2 重庆市滑坡与当日激发降雨强度关系

Tab. 2 Relationship between landslide and intensity of induced rainfall in Chongqing

当日激发降雨强度/mm	滑坡数/个	占滑坡总数比例/%
0	17	11.48
小雨,(0,10)	23	15.54
中雨,[10,25)	23	15.54
大雨,[25,50)	31	20.95
暴雨,[50,∞)	54	36.49
合计	148	100

由表 2 可知,超过 88.52% 的滑坡发生时当天

都有降雨,表明当天降雨对滑坡的发生有显著影响。11.48% 的滑坡发生当天没有降雨,此类滑坡属于先雨后滑型滑坡,完全受到前期降雨量的影响。结果表明,重庆市滑坡的发生不仅受当天降雨量的影响,且前期降雨与滑坡发生也有很大的相关性。

将前面所收集的降雨资料,输入 SPSS 软件处理分析,获得 Logistic 回归方程中的相关统计变量。由表 3 可知,滑坡发生前 1 日降雨量(R_1)回归系数最大,表示滑坡发生前 1 日降雨对诱发滑坡作用最为明显,且距离滑坡发生时间越久,滑坡降雨量相关系数明显下降。滑坡发生当日及前 3 日($R_0 \sim R_3$)相关系数都为正值,滑坡发生前 4 日(R_4)相关系数为负数,这表明降雨量增加滑坡发生可能性反而减小,这明显与实际情况不符。换言之,滑坡前 3 天的降雨对滑坡有较大影响,而这段时间的降雨是滑坡的有效降雨,而前三天之前的降雨对滑坡的影响几乎没有。

表 3 Logistic 回归方程相关统计变量

Tab. 3 Logistic regression equation related statistical variables

降雨因子	回归系数 B	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著水平	期望值
R_0	0.12	0.04	12.23	1	0.00	1.02
R_1	0.14	0.02	15.07	1	0.00	1.00
R_2	0.08	0.02	11.65	1	0.00	0.98
R_3	0.02	0.01	9.79	1	0.01	1.15
R_4	-0.01	0.04	2.55	1	0.24	0.92
R_5	-0.19	0.24	0.65	1	0.42	1.21
R_6	0.01	0.09	0.16	1	0.69	1.04
常数项	3.27	1.42	5.28	1	0.12	2.13

Wald 检验值可以进一步解释不同降雨因素对诱发滑坡的影响,Wald 检验值相当于简单线性回归分析中的 t 检验,其检验统计变量渐进服从 χ_2^2 分布,当其自由度为 1、错误概率为 0.05 时, χ_2^2 分布值为 3.84。表 3 中 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R_3 Wald 检验值都大于 3.84,说明这四个变量拒绝变量不显著的假设,表明 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R_3 相对于滑坡发生具有显著的影响。这进一步说明了对于重庆市的滑坡灾害,滑坡发生当天的降雨量和滑坡发生前 3 天的降雨量对其影响最大,滑坡发生前 3 日以上的降雨对其影响可忽略不计。

使用上述 Crozier 提出的有效降雨量公式,通过计算,得到重庆市各个降雨型滑坡点的前期有效降雨量,表 4 为部分滑坡有效降雨量数据。

表 4 重庆市部分滑坡当日激发降雨强度与前期有效降雨数据

Tab. 4 Intensity of induced rainfall on the same day and preceding effective rainfall data of some landslides in Chongqing

样本编号	当日激发降雨强度/mm	前期有效降雨量/mm
1	0	22.90
2	0	22.20
3	0	40.19
4	2.01	43.93
5	2.03	51.61
6	5.88	24.83
7	12.16	7.44
8	52.48	80.84
9	85.10	26.24
10	102.80	0.29

将研究区 148 个滑坡降雨数据随机挑选 20 个出来进行后续的模型验证,随后将剩下的 128 个滑坡样本点在双对数坐标系上绘制成散点图,得到当日激发降雨强度与前期有效降雨量的关系,如图 3 所示。

3.2 降雨历时和累计降雨特征

目前,在许多研究中,降雨持续时间 D 的确定是由研究人员的经验直接给出的(通常采用 3 d、10 d 或 15 d),但这种方法可能存在一定的误差。通过对降雨监测数据的分析,为了选定降雨历时 D,可以选择滑坡前足够的时间作为计算区间,采用较为常用的方法进行确定降雨历时:将降雨过程前连

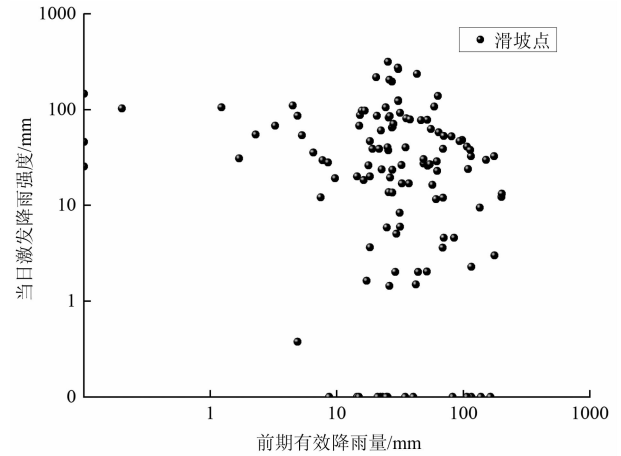


图 3 滑坡事件当日激发降雨强度与前期有效降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between intensity of stimulated rainfall on the day of landslide event and effective rainfall in early stage

续 24 h 累计雨量小于 10 mm 作为划分标准,即此刻为降雨历时的开始,将滑坡发生时间作为降雨历时 D 的结束^[26-27]。降雨历时计算区间的总降雨量为累计降雨量。

统计分析 148 个具有明确降雨时间的滑坡数据,得出重庆市滑坡降雨历时与当日激发降雨强度关系,表 5 为部分数据。将研究区 148 个滑坡降雨

表 5 重庆市部分滑坡降雨历时与当日小时激发降雨强度数据

Tab. 5 Data of rainfall duration and hourly rainfall intensity of some landslides in Chongqing

样本编号	降雨历时/h	当日小时激发降雨强度/mm
1	5	3.52
2	8	13.21
3	10	7.41
4	10	5.91
5	12	4.26
6	10	2.53
7	23	5.58
8	23	4.68
9	29	2.62
10	33	3.82
11	180	0.75
12	204	0.75
13	204	0.68
14	204	0.49
15	228	0.90

数据随机挑选 20 个出来进行后续模型验证,并将剩下的 128 个滑坡样本点在双对数坐标系上绘制成散点图,得到当日小时激发降雨强度与降雨历时的关系(图 4)。

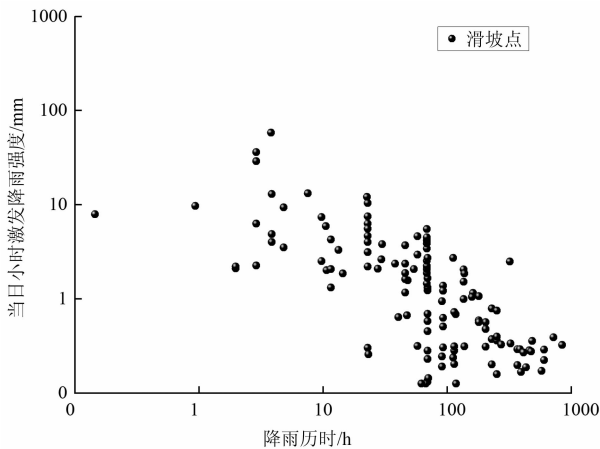


图 4 滑坡事件当日小时激发降雨强度与降雨历时的关系

Fig. 4 Relationship between rainfall intensity and rainfall duration on the day of landslide event

将研究区 148 个滑坡累计降雨数据随机挑选 20 个进行后续模型验证,并将剩下的 128 个滑坡样本点在双对数坐标系上绘制成散点图,得到当日小时激发降雨强度与累计降雨量的关系(图 5)。

4 滑坡降雨阈值分析

4.1 降雨强度-前期有效降雨量(*I-P*) 阈值模型

将之前获得的当日激发降雨强度与前期有效降雨量的关系(图 3),采用 OLSR 法进行不同概率降雨临界值的确定(图 6)。综合参考《暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级》以及文献[28]中的划分标准,求取 15%、50%、70% 和 90% 概率下诱发滑坡的 *I-P* 阈值曲线^[28]。得到各级别的临界阈值方程,各级别降雨阈值表达式分别为: $I_{15\%} = 4.86P^{-0.228}$ 、 $I_{50\%} = 39.69P^{-0.228}$ 、 $I_{70\%} = 101.42P^{-0.228}$ 、 $I_{90\%} = 214.02P^{-0.228}$ 。

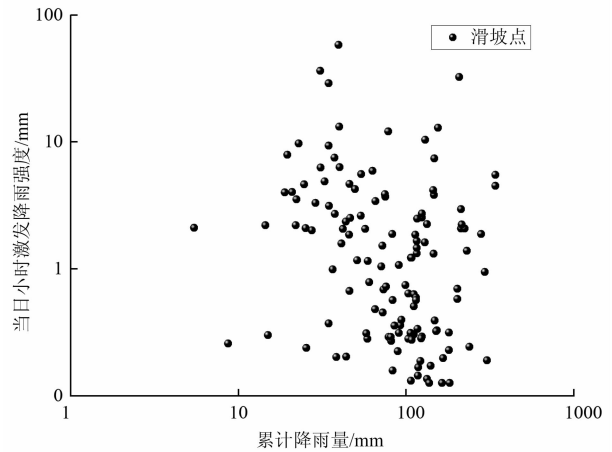


图 5 滑坡事件当日小时激发降雨强度与累计降雨的关系

Fig. 5 Relationship between intensity of stimulated rainfall and cumulative rainfall on hourly day of landslide event

根据 *I-P* 阈值曲线对滑坡灾害的危险性进行分级,滑坡危险性分级如表 6 所示。

从图 6 可以看出,随着前期有效降雨量的增大,诱发滑坡所需要的当日激发降雨量在减少,两个降雨因子间存在明显的负相关关系。把选取的各降雨型滑坡灾害点投影到该双对数坐标系中,当灾害点位于 90% 阈值曲线上方时,则说明当日激发降雨量和有效降雨强度已经超过了滑坡发生概率为 90% 的预警值,此滑坡处于极高危险范围,且在 90% 阈值曲线上方距离阈值曲线越远,说明发生概率越大;同理,当灾害点位于 75% 阈值曲线和 90% 阈值曲线之间时,则说明此滑坡处于高危险范围,当灾害点位于 50% 阈值曲线和 75% 阈值曲线之间时,则说明此滑坡处于中等危险范围,当灾害点位于 15% 阈值曲线和 50% 阈值曲线之间时,则说明此滑坡处于低危险范围,当灾害点位于 15% 阈值曲线之下,则说明此滑坡处于安全阶段。

同时,从统计学的意义来说,50% 降雨阈值曲线可以理解为警报线,即降雨型滑坡开始大量发生的阈值曲线,15% 降雨阈值曲线可以理解为预警线,即降雨型滑坡开始发生的阈值曲线,当灾害点投影于

表 6 滑坡危险性分级表

Tab. 6 Landslide risk classification table

滑坡发生概率	(0% ~ 15%)	[15% ~ 50%)	[50% ~ 70%)	[70% ~ 90%)	[90% ~ 100%)
危险性分级	安全	低	中	高	极高

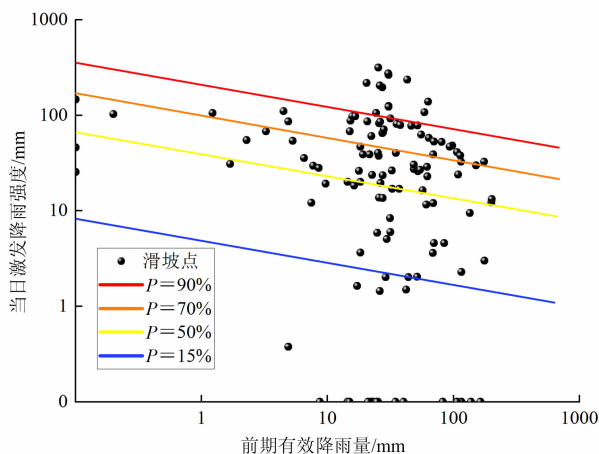
图6 基于 OLSR 方法划分的 $I-P$ 降雨阈值模型临界曲线

Fig. 6 Critical curve of $I-P$ rainfall threshold model based on OLSR method

15% 降雨阈值曲线之上时,则说明可能会存在降雨型滑坡发生,需要加强巡视,警惕滑坡的发生^[27]。

4.2 降雨强度-降雨历时 ($I-D$) 阈值模型

同建立降雨强度-前期有效降雨量 $I-P$ 阈值模型相似,采用 OLSR 法进行不同概率降雨临界值的确定(图 7),得到降雨强度-降雨历时 $I-D$ 阈值模型各级别的临界阈值方程,各级别降雨阈值表达式分别为: $I_{15\%} = 4.68D^{-0.64}$ 、 $I_{50\%} = 14.45D^{-0.64}$ 、 $I_{70\%} = 25.96D^{-0.64}$ 、 $I_{90\%} = 50.42D^{-0.64}$ 。

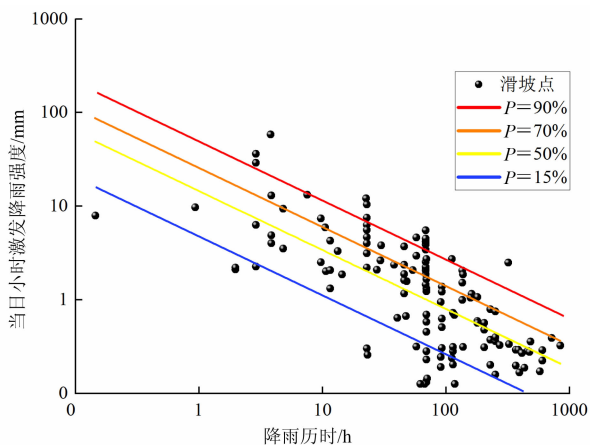
图7 基于 OLSR 方法划分的 $I-D$ 降雨阈值模型临界曲线

Fig. 7 Critical curve of $I-D$ rainfall threshold model based on OLSR method

4.3 降雨强度-累计降雨量 ($I-E$) 阈值模型

同理,采用 OLSR 法进行不同概率降雨临界值的确定(图 8),获取降雨强度-累计降雨量 $I-E$ 阈值

模型各级别的临界阈值方程,各级别降雨阈值表达式分别为: $I_{15\%} = 2.31E^{-0.491}$ 、 $I_{50\%} = 8.45E^{-0.491}$ 、 $I_{70\%} = 20.37E^{-0.491}$ 、 $I_{90\%} = 47.51E^{-0.491}$ 。

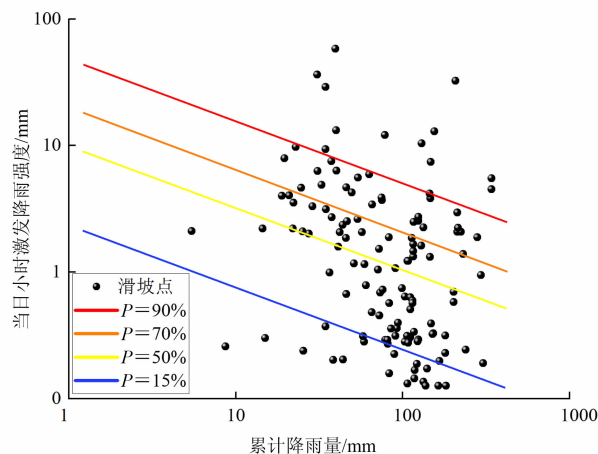
图8 基于 OLSR 方法划分的 $I-E$ 降雨阈值模型临界曲线

Fig. 8 Critical curve of $I-E$ rainfall threshold model based on OLSR method

5 阈值模型验证

5.1 阈值模型验证分析

为了与实际情况准确地比较三种降雨阈值模型的精确度,将随机挑选出来的 20 个降雨型滑坡数据点代入已建立好的降雨阈值模型中进行验证,具体验证结果如图 9 所示。

经验算, $I-D$ 阈值模型中的 20 个降雨型滑坡数据点有 90% 在滑坡发生概率高于 50% 的区域,分别优于 $I-P$ 阈值模型的 75% 和 $I-E$ 阈值模型的 70%; $I-D$ 阈值模型中的 20 个降雨型滑坡数据点中有 60% 的数据点在滑坡发生概率高于 75% 的区域,分别优于 $I-P$ 阈值模型的 45% 和 $I-E$ 阈值模型的 35%;这表明,本文建立的三个降雨阈值模型中, $I-D$ 降雨阈值模型对降雨诱发滑坡具有更高的预测精度,能更加准确的反应重庆市的实际情况。

根据上述的研究成果,本文准备采取 $I-D$ 降雨阈值模型对重庆市滑坡进行区域气象预警工作。结合前文降雨与滑坡关系的研究,降雨型滑坡主要与前三天降雨相关性大,因此采用 $I-D$ 降雨阈值模型进行预警,结果如表 7 所示。当滑坡隐患点处于降雨期间时,需采用 $I-D$ 降雨阈值模型曲线进行等级划分,当 $I_{15\%} > 4.68D^{-0.64}$ 时,对应预警等级为注意

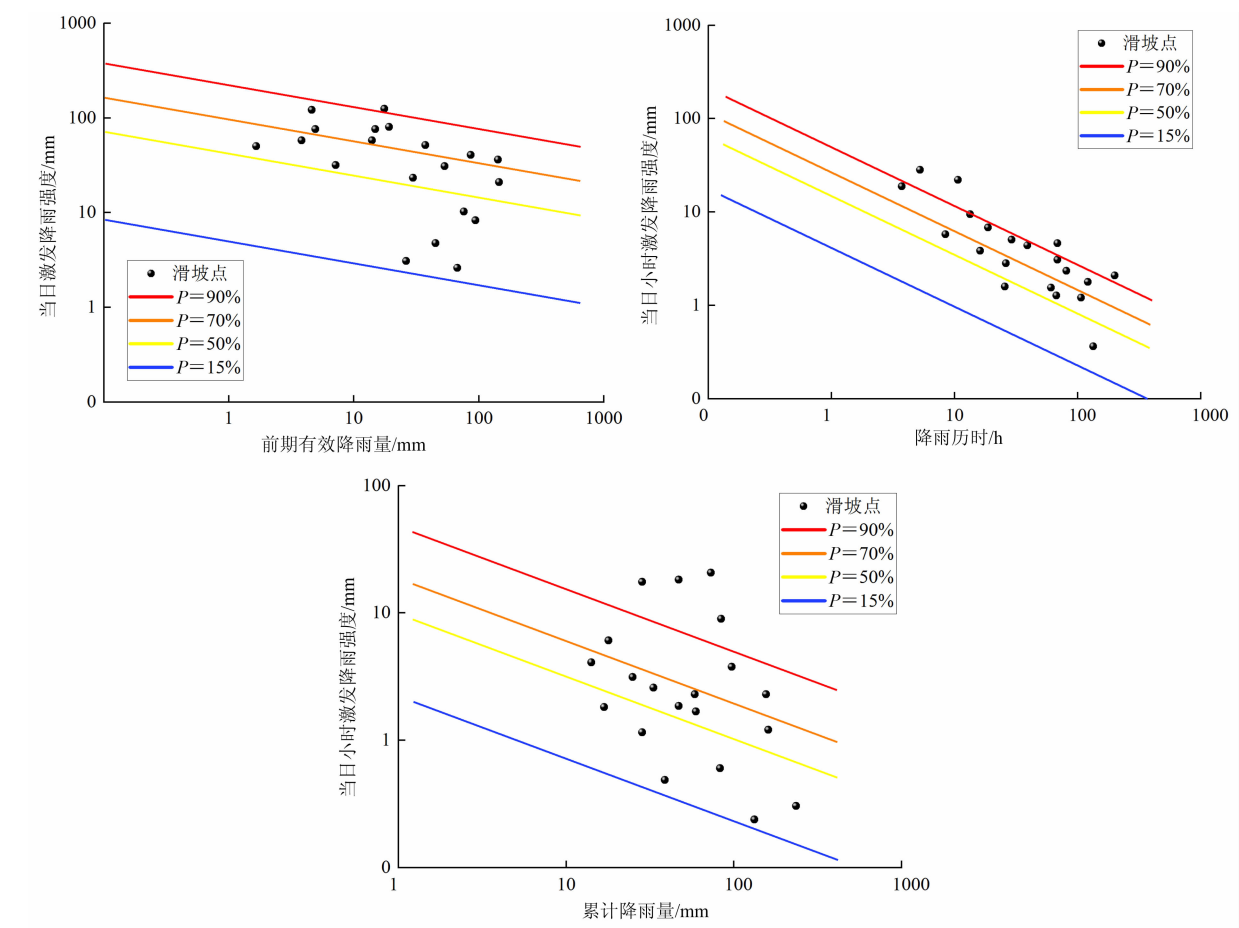


图 9 三个阈值模型验证对比

Fig. 9 Three threshold model validation comparison

级,当 $I_{50\%} > 14.45D^{-0.64}$ 时,对应预警等级为警示级,当 $I_{70\%} > 25.96D^{-0.64}$ 时,对应预警等级为警戒级,当 $I_{90\%} > 50.42D^{-0.64}$ 时,对应预警等级为警报级。将这四种预警等级作为重庆市降雨型滑坡临界预警阈值,分别对应蓝色、黄色、橙色和红色四种预警形式。

表 7 重庆市降雨型滑坡各级别对应预警等级

Tab. 7 Corresponding early warning grades of rainfall landslides in Chongqing

降雨阈值模型	对应预警等级及形式
$I_{15\%} > 4.68D^{-0.64}$	注意级
$I_{50\%} > 14.45D^{-0.64}$	警示级
$I_{70\%} > 25.96D^{-0.64}$	警戒级
$I_{90\%} > 50.42D^{-0.64}$	警报级

5.2 滑坡实例验证

5.2.1 杜家坝滑坡基本概况

杜家坝滑坡位于重庆市城口县巴山镇元坝村四组,距离巴山镇约 1.4 km,其空间地理位置坐标为 $108^{\circ}29'16.09''E, 32^{\circ}6'32.72''N$,属低山地貌,滑坡前缘高程约为 700 m,后缘高程约 800 m,平均高程约 750 m,坡度约 40° ,纵向长约 200 m,横向宽约 30 m,厚度约 5 m,面积约 $6 \times 10^3 m^2$,体积约 $3 \times 10^4 m^3$,为小型岩质滑坡,主滑方向为 265° ,滑坡下伏基岩为震旦系上统灯影组(Z2dn)灰黄色灰岩,岩层倾向 60° ,倾角 28° 。滑坡潜在威胁居民 73 户 339 人、房屋 30 间和财产 200 万元。2020 年杜家坝滑坡被纳入全市 3 级监测智能化监测预警体系,由重庆地质矿产研究院负责建设和维护,滑坡共布设 2 台地面裂缝计和 1 台报警器,目前滑坡基本处于稳定状态,现有变形迹象主要集中在滑坡后缘附近。

5.2.2 降雨数据分析

杜家坝滑坡所处地区属亚热带季风气候,具有山区立体气候的特征。年平均降雨量 1361.1 mm,年平均降雨日数为 170 d,2001 年中有 182 d 存在降雨,2002 年仅 98 d 存在降雨;最大年雨量为 2001 年出现的 1421.2 mm,最少年雨量为 2002 年出现的 119.5 mm。

据实地调查走访,村民反映杜家坝滑坡曾于 2010 年 7 月 17 日发生过一次滑坡,为了更好验证 $I-D$ 降雨阈值模型的准确性,特收集城口县雨量站的降雨数据,通过对月降雨量和七月日降雨量的分析,发现降雨主要集中在每年 4—9 月,7 月最多(图 10),且通过单独对杜家坝滑坡 7 月份降雨数据进行统计分析发现(图 11),在 7 月 14 日到 7 月 16 日四天内有三天为暴雨^[29],四日累计雨量为 312.9 mm,再结合村民反应在 7 月 17 日发生过滑坡,可以推断杜家坝滑坡主要诱因为降雨,属降雨型滑坡,且恰好证明了监测数据的真实可靠性。

5.2.3 降雨预警模型验证

针对建立的降雨阈值模型的合理性,在得到降雨数据及具体滑坡发生日期后,可以进行进一步的验证。对获取的数据进行统计后,得到滑坡发当日小时降雨强度为 3.53 mm/h,降雨历时为 96 h,累计降雨量为 312.9 mm。通过累计降雨量与我们所述的重庆市降雨型滑坡累计雨量预警及对应预警等级比较,可以看出滑坡当日已处于红色预警级别。通过前面三个阈值分析模型对比可知, $I-D$ 降雨阈值模型精度更高。

将 2010 年 7 月 14 日到 7 月 17 日期间的降雨数据进行统计分析,得到滑坡发生前四日的降雨特征值(表 8)。

将这四组数据投影于建立的降雨强度-降雨历时($I-D$)阈值模型中(图 12),可以看到,从 2010 年 7 月 14 日降雨开始,当日的预警等级已经到达了黄色预警,随着降雨的增加,在 7 月 15 日接近于橙色预警但并未达到,到 7 月 16 日,当日迎来本月最大

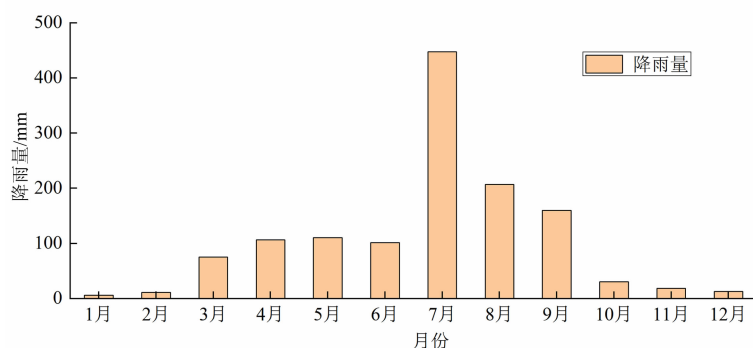


图 10 杜家坝滑坡 2010 年各月降雨量

Fig. 10 Monthly rainfall of Dujiaba landslide in 2010

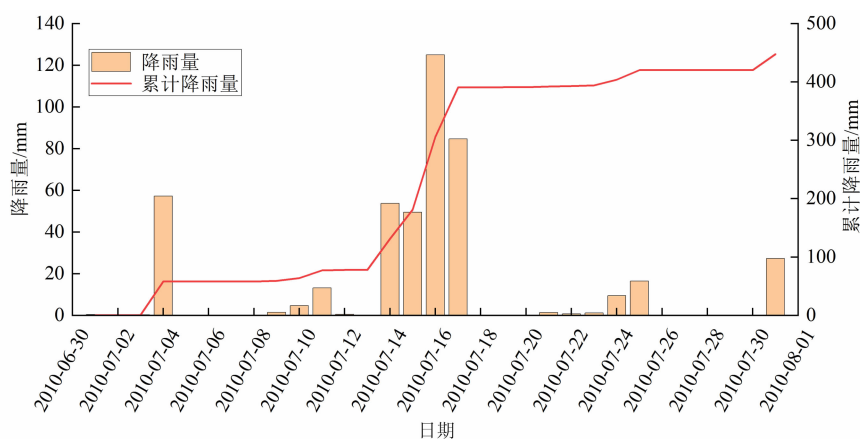


图 11 杜家坝滑坡 7 月降雨量及累计降雨量

Fig. 11 July rainfall and accumulated rainfall of Dujiaba landslide

降雨,当日降雨达到 125 mm,滑坡预警等级直接突破至红色预警等级,而正是随着前面降雨的累加,到了 7 月 17 日,随着当日达到 84.7 mm 的暴雨,滑坡最终发生。从这个可以看出,这次滑坡的发生完全是由多日强降雨诱发,随着降雨的增加,预警等级也随之递增,因此证明了所建立的降雨阈值模型的合理性。

表 8 杜家坝滑坡发生期间降雨特征值

Tab.8 Characteristic value of rainfall during dujiaba landslide

降雨历时/h	当日小时降雨强度/mm
24	2.238
48	2.063
72	5.208
96	3.530

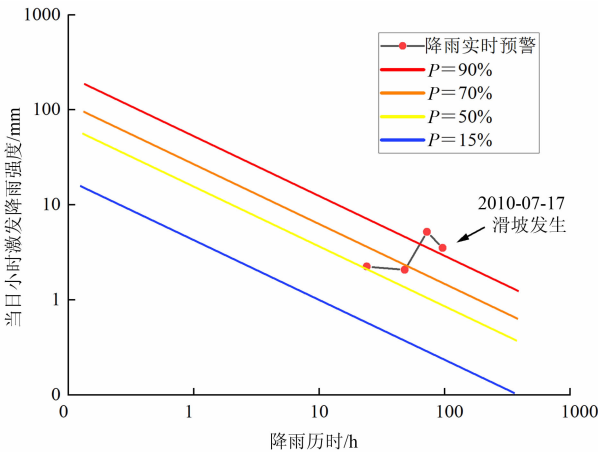


图 12 降雨等级实时预报验算

Fig.12 Real-time forecasting of rainfall grade

6 结论

本文以重庆地区 148 个降雨型滑坡为研究对象,统计分析其降雨特征,建立 *I-P*、*I-D* 和 *I-E* 三种降雨阈值模型,对比分析选择最优降雨阈值模型作为重庆市降雨型滑坡预警判据,得到结论如下:

(1)重庆市滑坡主要发生在汛期(5—9 月),该时期发生滑坡比例占 84.56%,且 88.52%,滑坡发生当日均存在降雨;同时采用 Logistic 回归模型对滑坡与前几日降雨进行相关性分析,得到滑坡发生前 1 日降雨对诱发滑坡作用最为明显,且距离滑坡发

生时间越久,滑坡降雨量相关系数明显下降。

(2)三种降雨阈值模型中,*I-D* 模型滑坡数据点有 90%在滑坡发生概率高于 50%的区域,分别优于 *I-P* 模型的 75%和 *I-E* 模型的 70%;*I-D* 模型滑坡数据点中有 60%的数据点在滑坡发生概率高于 75%的区域,分别优于 *I-P* 模型的 45%和 *I-E* 模型的 35%,*I-D* 模型对降雨诱发滑坡具有更高的预测精度,更适用于重庆市降雨型滑坡监测预警工作。

7 讨论

降雨预警模型主要根据有降雨历史与滑坡相关信息记录的历史案例,从降雨历时、雨量、强度及雨型对滑坡的影响等方面统计分析,建立滑坡与降雨关系模型。重庆市降雨数据资料丰富,但其地域辽阔,大空间区域内的降雨情况以及地质地貌条件复杂多样,降雨型滑坡受降雨条件、边坡地形地质条件等多个条件影响,对于降雨预警阈值难以完全量化分析。针对大空间区域滑坡降雨阈值模型,结合降雨型滑坡的特点、历史降雨条件特征等,可进行精细化的区域划分,如破坏模式、坡体结构、坡体形态,系统地开展不同发育特征滑坡的精细化预警阈值分析,能更好的对区域内降雨型滑坡进行预警,而不再局限于区域宏观降雨预警阈值。

参考文献(References)

[1] BAI Shibiao, WANG Jian, THIEBES B, et al. Analysis of the relationship of landslide occurrence with rainfall: A case study of Wudu county, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014,7 (4):1277-1285. DOI: 10.1007/s12517-013-0939-9

[2] GLADE T, CROZIER M, SMITH P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model" [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000,157(6):1059-1079. DOI: 10.1007/s000240050017

[3] GUZZETI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update [J]. Landslides, 2008,5(1):3-17. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1

[4] MARTINOVIC K, GAVIN K, REALE C, et al. Rainfall thresholds as a landslide indicator for engineered slopes on the Irish Rail network [J]. Geomorphology, 2018,306:40-50. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.006

[5] IRAWAN A M, VIRGIANTO R H, SAFRIL A, et al. Rainfall threshold and soil moisture indexes for the initiation of landslide in

- Banjarmangu sub-district, central Java, Indonesia [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, **243** (1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/243/1/012028
- [6] 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, 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] DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2012.05.18
- [7] CAMPBELL R H. Debris flows originating from soil slips during rainstorms in southern California [J]. Engineering Geology, 1974, **7** (4):339-349. DOI: 10.1144/GSL.QJEG.1974.007.04.04
- [8] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 2004, **73**(3-4):247-265. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.007
- [9] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, **98**(3-4):239-267. DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7
- [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 values of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang province [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, **22**(4): 101-105] DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2003.04.019
- [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. County-level rainfall warning thresholds for rainfall-induced landslides in Yunnan [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, **43**(4):675-680] DOI: 10.19517/j.1671-6345.2015.04.019
- [12] 李晓. 重庆地区的强降雨过程与地质灾害的相关分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, **6**(3):39-42. [LI Xiao. Relative analysis between strong rainfall process and geological hazards Chongqing city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, **6**(3):39-42] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.1995.03.007
- [13] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨的概率分析[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] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.029
- [14] 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] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.03.020
- [15] 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] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.012
- [16] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 等. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, **27**(4):103-111. [LI Huanyu, CHEN Zhaohui, FAN Wenliang, et al. The statistical risk analysis model of rainfall-induced landslide in large areas [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, **27**(4):103-111] DOI: 10.13577/j.jnd.2018.0414
- [17] ALTHUWAYNEE O F, ASIKOGLU O, ERIS E. Threshold contour production of rainfall intensity that induces landslides in susceptible regions of northern turkey [J]. Landslides, 2018, **15** (8):1541-1560. DOI: 10.1007/s10346-018-0968-2
- [18] HARILAL G T, MADHU D, RAMESH M V, et al. Towards establishing rainfall thresholds for a real-time landslide early warning system in Sikkim, India [J]. Landslides, 2019, **16**(12):2395-2408. DOI: 10.1007/s10346-019-01244-1
- [19] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence [J]. Landslides, 2018, **15**(8):1483-1501. DOI: 10.1007/s10346-018-0966-4
- [20] PRADHAN A M S, LEE S R, KIM Y T. A shallow slide prediction model combining rainfall threshold warnings and shallow slide susceptibility in Busan, Korea [J]. Landslides, 2018, **16** (3):647-659. DOI: 10.1007/s10346-018-1112-z
- [21] CROZIER M J. Landslides causes, consequences and environment [M]. London: Croom Helm, 1986:185-189.
- [22] 魏来. 降雨诱发滑坡预测模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. [WEI Lai. Study on the prediction model of landslide induced by rainfall [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013] DOI: 10.7666/d.Y2302894
- [23] 杨丽红, 周正朝. 最小二乘与分位数回归方法在河流水沙研究中的应用——以陕北延河流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12**(5):45-51. [YANG Lihong, ZHOU Zhengchao. Comparison of ordinary least square regression and quantile regression in the study of hydrological elements of Yanhe River basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, **12**(5):45-51] DOI: 10.16843/j.sswc.2014.05.008
- [24] 刘谢攀, 殷坤龙, 肖常贵, 等. 基于I-D-R阈值模型的滑坡气象预警[J/OL]. 地球科学, 2022:1-15. [LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on I-D-R threshold model [J/OL]. Earth Science, 2022:1-15] DOI: 10.3799/dqkx.2022.233

- [25] 马力, 曾祥平, 向波. 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析[J]. 山地学报, 2002, **20**(2): 246 – 249. [MA Li, ZENG Xiangping, XIANG Bo. Relationship between the slope slides and precipitation in Chongqing [J]. Mountain Research, 2002, **20**(2): 246 – 249] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2002.02.021
- [26] 刘海知, 徐辉, 包红军, 等. 区域降雨诱发滑坡阈值特征分析[J]. 自然灾害学报, 2021, **30**(4): 181 – 190. [LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Characteristics analysis of rainfall-induced landslide thresholds in local regions [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, **30**(4): 181 – 190] DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0420
- [27] 丛佳伟. 天水地区降雨型滑坡的降雨阈值研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [CONG Jiawei. Rainfall threshold research of rainfall-induced landslides in Tianshui area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019] DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2020.003503
- [28] 黄发明, 陈佳武, 范宣梅, 等. 降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模[J]. 地球科学, 2022, **47**(12): 4609 – 4628. [HUANG Faming, CHEN Jiawu, FAN Xuanmei. Logistic regression fitting of rainfall-induced landslide occurrence probability and continuous landslide hazard prediction modelling [J]. Earth Science, 2022, **47**(12): 4609 – 4628] DOI: 10.3799/dqkx.2021.164
- [29] 王昌明. 山西吕梁黄土滑坡成灾模式及降雨预警模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [WANG Changming. Study on characteristics of Lvliang loess landslide and rainfall early warning model in Shanxi province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019] DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2019.000804

Early Warning Model of Rainfall-Induced Landslide in Chongqing of China Based on Rainfall Threshold

ZHOU Jian¹, TANG Minggao^{1*}, XU Qiang¹, WU Huilong¹, WANG Xinmin²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Nanjiang Hydrogeological Engineering Geological Team of Chongqing Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Chongqing 401147, China)

Abstract: Rainfall-induced landslides occur frequently in Chongqing, which has been a hotspot of research on empirical rainfall threshold and prediction model of rainfall-induced landslides. However, the empirical rainfall threshold has regional limitations, and the applicability and accuracy of different types of rainfall threshold models in Chongqing are also different. In this case study, the evidence of 148 rainfall-induced landslides in Chongqing was collected for statistical analysis. The precipitation patterns were depicted, and three rainfall threshold models, *I-P*, *I-D*, and *I-E* were separately used for a comparison of prediction accuracy. Ordinary least squares regression (OLSR) was used to determine the critical threshold curve, and an optimal rainfall threshold model was selected as early warning criterion of landslide. The following results are obtained: (1) Landslides in Chongqing mainly occurred from May to September in flood season, and more than 88.52% of landslides had rainfall on the same day. (2) The induction effect of rainfall on landslides one day before a landslide event was most obvious, and the longer the time lag between an occurrence of landslides and rainfall, the correlation coefficient between the landslide event and the amount of rainfall decreased significantly. (3) After accuracy comparison of the three rainfall threshold models, it was found that the rainfall intensity-duration of rainfall (*I-D*) threshold model was more suitable for Chongqing rainfall-type landslide monitoring and early warning. The research can provide a scientific basis and reference for government in landslide warning and control.

Key words: rainfall-type landslide; threshold model; monitoring and early warning; Chongqing