

四川省滑坡灾害气象预报方法及其在延伸期-月尺度中的应用

柳锦宝¹ 陶星宇¹ 刘志红¹ 高瑜莲¹ 肖斌¹ 孙昭萱² 杨淑群²

(1 成都信息工程大学, 成都 610225; 2 四川省气候中心 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610027)

摘要: 分析四川省2014—2018年滑坡灾害与前期降水量之间的关系, 构建滑坡灾害气象预报模型, 并验证模型在延伸期-月尺度中的应用效果, 为四川省延伸期滑坡灾害预报工作提供理论参考。利用历史实测降水数据对四川省滑坡灾害发生的前45 d、35 d、25 d、15 d、10 d和6 d降水量进行统计分析, 结果显示, 滑坡灾害的发生与其相关性是逐步递减的; 在此基础上, 结合逻辑回归法分析滑坡灾害发生前2 d降水量的权重关系, 得到降水诱发滑坡灾害概率值; 再确定滑坡灾害预报模型的易发性背景值与降水诱发滑坡灾害概率值的权重系数; 最后, 分别计算川东、川西和川西南三个区域临界雨量, 优化滑坡灾害预报模型。结果表明: 四川省滑坡灾害发生当日、前1 d和前2 d降水量对灾害的影响权重分别为0.048、0.031和0.029; 滑坡灾害模型的易发性概率值和降水诱发滑坡灾害概率值的权重参数川东为0.249和0.751, 川西为0.655和0.345, 川西南为0.501和0.499; 分区域临界雨量计算结果有明显差异, 川东地区临界雨量值最大, 川西南地区次之, 川西地区最小。利用CFSv2降水预报产品对滑坡灾害预报模型在延伸期-月尺度中的应用效果进行验证, 证实模型对延伸期滑坡灾害整体有较好的预报效果。

关键词: 延伸期, 滑坡, 降水特征, 临界雨量, 气象灾害预报模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.018

Meteorological Forecast Method of Landslide Disaster in Sichuan Province and Its Application in Extended Period Month Scale

Liu Jinbao¹, Tao Xingyu¹, Liu Zhihong¹, Gao Yulian¹, Xiao Bin¹, Sun Zhaoxuan², Yang Shuqun²

(1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Sichuan Climate Center/ Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610027)

Abstract: This paper analyzes the relationship between the landslide disaster and the early precipitation in Sichuan Province from 2014 to 2018, constructs the meteorological forecast model of landslide disaster, and verifies the application effect of the model in the extend-month scale, which provides theoretical reference for the prediction of landslide disaster in Sichuan Province during the extend-month period. Based on the historical measured precipitation data, the precipitation in the first 45-day, 35-day, 25-day, 15-day, 10-day and 6-day of geological disasters in Sichuan Province was statistically analyzed. The results showed that the occurrence of landslide and its correlation is gradually diminishing. On this basis, combined with logistic regression method, the weight relation of the precipitation in the 2-day before the occurrence of landslide disaster was analyzed, and the probability value of precipitation induced landslide disaster was obtained. The weight coefficients of the background value of the landslide disaster prediction model and the probability value of the landslide disaster induced by precipitation are determined again. Finally, the critical rainfall in the three regions of Eastern Sichuan, Western Sichuan and Southwest Sichuan are calculated respectively, and the landslide disaster prediction model is optimized. The results show that the influence weight of precipitation on the day of occurrence, the precipitation in the 1-day and the precipitation in the 2-day before the landslide disaster in Sichuan Province are 0.048, 0.031 and 0.029 respectively. The weight parameters of the probability value of the landslide disaster model and the probability value of the landslide disaster induced by precipitation are 0.249, 0.751 in Eastern Sichuan, 0.655 and 0.345 in Southwest Sichuan, and 0.501 and 0.499 in Western Sichuan. There are obvious differences in the calculation results of regional critical rainfall. The critical rainfall value is the highest in Eastern Sichuan, the second in Southwest Sichuan, and the smallest

in Western Sichuan. The application effect of the landslide disaster prediction model in the extend-month scale is verified by using CFSv2 precipitation prediction product, which proves that the model has a good overall prediction effect on the extend-month landslide disaster.

Keywords: extension period, landslide, precipitation characteristics, critical rainfall, meteorological disaster prediction model

收稿日期: 2020年8月28日; 修回日期: 2021年4月19日
第一作者: 柳锦宝(1979—), Email:liujinbao1107@163.com
资助信息: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFS0328);
延伸期精细化格点逐候滚动预测技术
(SCQXKJZD2019002); 四川气候智能网格数
据处理与预测技术(省重点实验室2018-重点-07)

0 引言

围绕降水诱发滑坡灾害的成因以及预报的方法，国内外学者对降水诱发的滑坡灾害的发生与前期降水量的关系进行了研究，并取得了一些成果^[1-14]。但由于不同地区的致灾因子不同，如坡度、坡向、高程、地质、岩性等，使得诱发滑坡灾害的降水特征不同。Glade 等^[15]采用统计方法研究得出降水诱发、非降水诱发这两种情况下滑坡发生的降水量阈值。我国学者从20世纪90年代开始了对滑坡灾害与降水量关系的研究，主要包括降水类型、降水持续时间、降水量和累积降水量等^[16-20]，盛逸凡等^[21]等全面分析了近30a降水及滑坡数据，进而对滑坡及滑坡数量与降水因子的关系开展了统计分析研究发现，随着距离滑坡发生前天数的增加，降水因子与滑坡的相关性呈现出下降的趋势；林巍等^[22]通过分析武陵山区慈利县前期降水与滑坡事件的相关性，发现研究区累积前3 d降水与滑坡灾害相关性最大，可作为滑坡灾害预警的关键时间；叶殿秀等^[23]分析了滑坡灾害与发生前各个时段降水的强度、持续时间、总量等之间的关系，初步确定不同保证率下诱发三峡库区滑坡灾害发生的临界降水量值；李宇梅等^[24]应用1950—2014年滑坡灾害历史灾情数据，选取高斯拟合方法分区建立滑坡灾害概率预报方程，制定滑坡灾害风险预警当日临界雨量阈值指标；沈玲玲等^[25]应用精度较高的TRMM降水数据，分析了2000—2012年四川省发生的重大滑坡灾害，提取出每次地质灾害发生前30 d、前15 d、前3 d和当日的降水数据，采用主成分分析法分析，发现以灾害发生前30 d、前15 d、前3 d有效降水量因子组成的前期降水这一主成分在滑坡泥石流灾害中贡献率较高。

四川省境内降水充沛且集中，导致滑坡灾害频发。据统计，2014—2018年四川省已发生滑坡灾害共5266处，面对众多的滑坡灾害隐患点，预防滑坡灾害突发危害需要更精准、及时的监测预报手段。本文在前期研究的基础上，根据已有的易发性背景模型开展四川省滑坡灾害气象预报技术研究，计算川东、川西、川西南三个区域的临界雨量，优化滑坡灾害预报模型，提高滑坡灾害预报模型的精度，并将其应用到延伸期预报中，为相关部门提供决策参考支持。

1 研究区概况

四川省地跨我国一、二级地貌台阶，山地丘陵广布，区内地形起伏悬殊，地层岩性复杂，断裂构造发育，地震活动频繁，气候复杂多变，为四川省滑坡灾害频发提供了条件（图1）。同时，受青藏高原对东亚季风、南亚季风阻挡的影响，四川省降水充沛且集

中。内外因素共同作用致使四川省成为西南地区滑坡灾害最为频发的省份。

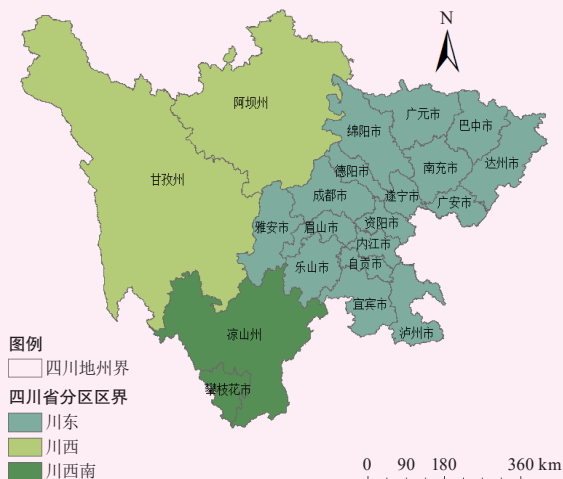


图1 四川省行政区划图

Fig.1 Administrative division map of Sichuan Province

2 研究方法及原理

2.1 逻辑回归原理

逻辑回归是一种基于统计学和确定性模型相结合的分析方法^[26]。由于降水因子为非连续变量，本文使用逻辑回归分析中的二元逻辑回归方法进行分析^[27]。

假设某区域内发生滑坡灾害的概率为 P （取值范围为 $0 \sim 1$ ），则不发生滑坡灾害的概率为 $1-P$ ，滑坡灾害逻辑回归值为 $P/(1-P)$ 。对其取自然对数，设 X_1, X_2, \dots, X_n 为自变量，其中 X_1 为当日降水量， X_2 为前1 d降水量，依次类推；设滑坡灾害发生概率 P 为因变量，则逻辑回归方程可表示为^[21]：

$$\ln \frac{P}{1-P} = A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n, \quad (1)$$

式中： B_1, B_2, \dots, B_n 为各致灾因子对应的逻辑回归系数。

变换式（1）可得：

$$P = \frac{\text{EXP}(A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n)}{1 + \text{EXP}(A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n)}, \quad (2)$$

利用式（2）可建立易发性区划评价模型。

2.2 临界雨量计算

通过统计归纳的方法计算临界雨量，假设区域内共有 S 个雨量站，共发生滑坡灾害 N 次，共统计 T 个时间段平均雨量，采用算术平均法计算区域内与历史滑坡灾害对应的各时段平均雨量。在各个时段的统计中，取最小值作为各区域、各时段的临界雨量初值，计算公式如下：

$$\bar{R}_{i, \text{临界}} = \min(\bar{R}_i) \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

式中： $\bar{R}_{t, \text{初}}$ 为区域临界雨量初值，单位为mm； \bar{R}_{tj} 为历时 t 的第 j 次滑坡灾害平均雨量，单位为mm； N 为区域内发生滑坡灾害的次数。

在各个时段的统计中，计算历史滑坡灾害平均雨量的平均值：

$$\bar{R}_t = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{R}_{tj})}{N} \quad (t=1, 3, 6, 12, 24 \text{ h}), \quad (4)$$

式中： \bar{R}_t 为区域平均临界雨量，单位为mm。

区域临界雨量的范围一般在 $\bar{R}_{t, \text{初}}$ 与 \bar{R}_t 之间，在该范围内有一定数量的灾害场次，只要降水在该范围内，就可能发生滑坡灾害^[28]。本文通过对2014—2018年的滑坡灾害资料进行分析整理，以易发性区划 H 值为划分标准，再按四川省分区情况分别计算临界雨量。

3 滑坡灾害阈值判别模型

3.1 滑坡灾害与降水量关系研究

3.1.1 滑坡灾害与日降水量的关系分析

将四川省气象台提供的2014—2018年小时降水数据合成为日降水数据，计算滑坡灾害与日降水量之间的关系。从图2a可以看出，灾害发生在最大降水日当日的比例为52%，灾害发生在最大降水日后1 d的比例为24%。从最大降水日后2 d开始，其灾害占比开始变得很小，表明滑坡灾害发生在最大降水日当日和后1 d的可能性最大。从图2b和图2c可以看出，滑坡灾害发生的可能性与降水量成正比，最大降水日有84%的灾害发生在日降水量大于50 mm时，最大降水日后1 d有64%的灾害发生在日降水量大于100 mm时。以上统计分析表明前期降水量对滑坡灾害的影响很大，且滑坡灾害的发生与强降雨在时间上既存在一致的情况，也存在滞后的情况。因此，可根据滑坡灾害与前期降水量相关性建立模型。

3.1.2 滑坡灾害与延伸期降水量相关性分析

1) 滑坡灾害与延伸期累积降水量相关分析

首先，对2014—2018年的滑坡灾害点与未发生滑坡灾害点的前45 d累积降水因子进行相关性分析（表1），根据张锡涛等^[29]和常鸣等^[30]的研究，本文建立滑坡灾害点3km缓冲区，使用ArcGIS软件在缓冲区外随机生成与有效灾害点相同数量的未发生灾害点。结果表明，灾害发生与否和累计降水日数增加的相关系数呈先上升后下降的规律。

2) 滑坡灾害与延伸期日降水量关系分析

其次，对灾害发生前45 d、35 d、25 d、15 d、10 d和6 d降水量分别进行相关性分析，结果显示，滑

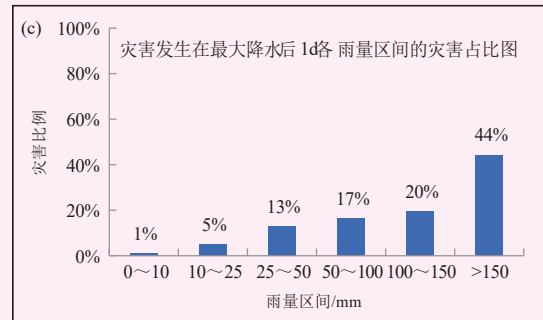
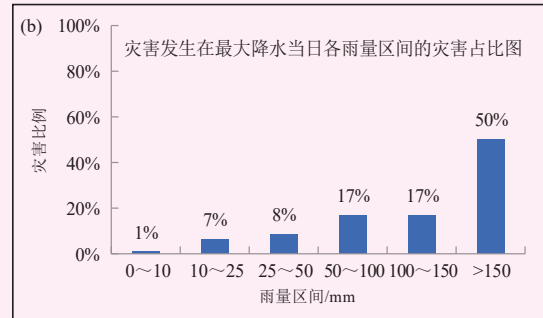
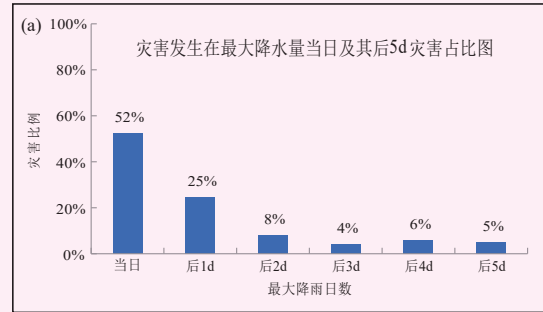


图2 滑坡灾害最大降水日数分布 (a) 与灾害发生在最大降水当日 (b) 及后1 d各雨量区间的灾害占比图 (c)

Fig. 2 The distribution of maximum precipitation days of landslide disasters (a) and the disaster proportion in each rainfall interval on the day of maximum precipitation (b) and the next day (c)

坡灾害的发生与前45 d、35 d、25 d、15 d、10 d、6 d降水量的相关性逐步递减。在此基础上，结合前6 d日降水因子与灾害的相关分析结果发现（表2），前3 d、前4 d、前5 d、前6 d相关性系数数量级下降幅度太大，表明灾害发生当日、前1 d和前2 d的降水量对于灾害是否发生的影响较大。

3.2 滑坡灾害与单元降水诱发灾害概率关系

进一步分析灾害是否发生与前2 d的降水量关系（表3和表4），经多次拟合，模型拟合度较高，各因子均通过显著水平为0.05的Wald检验，且因子间相关矩阵系数较小，模型整体预测的平均准确率达80.1%。

因此，降水诱发滑坡灾害的发生概率公式为：

表1 延伸期累积降水因子与灾害的相关分析

Table 1 Correlation analysis of cumulative precipitation factors and disasters in extensional period

累积降水因子	当日降水	2 d累积降水	3 d累积降水	4 d累积降水	5 d累积降水
灾害是否发生	0.451**	0.521**	0.545**	0.566**	0.574**
累积降水因子	6 d累积降水	7 d累积降水	8 d累积降水	9 d累积降水	10 d累积降水
灾害是否发生	0.578**	0.571**	0.563**	0.558**	0.558**
累积降水因子	11 d累积降水	12 d累积降水	13 d累积降水	14 d累积降水	15 d累积降水
灾害是否发生	0.557**	0.559**	0.549**	0.544**	0.544**
累积降水因子	16 d累积降水	17 d累积降水	18 d累积降水	19 d累积降水	20 d累积降水
灾害是否发生	0.536**	0.526**	0.524**	0.522**	0.518**
累积降水因子	21 d累积降水	22 d累积降水	23 d累积降水	24 d累积降水	25 d累积降水
灾害是否发生	0.512**	0.502**	0.498**	0.497**	0.497**
累积降水因子	26 d累积降水	27 d累积降水	28 d累积降水	29 d累积降水	30 d累积降水
灾害是否发生	0.494**	0.493**	0.486**	0.475**	0.461**
累积降水因子	31 d累积降水	32 d累积降水	33 d累积降水	34 d累积降水	35 d累积降水
灾害是否发生	0.447**	0.440**	0.428**	0.428**	0.433**
累积降水因子	36 d累积降水	37 d累积降水	38 d累积降水	39 d累积降水	40 d累积降水
灾害是否发生	0.435**	0.437**	0.433**	0.422**	0.415**
累积降水因子	41 d累积降水	42 d累积降水	43 d累积降水	44 d累积降水	45 d累积降水
灾害是否发生	0.410**	0.408**	0.406**	0.403**	0.401**

注: **表示在0.01显著性水平上显著相关。

表2 日降水因子与灾害的相关分析

Table 2 Correlation analysis of daily precipitation factors and disasters

累积降水因子	当日降水	前1 d降水	前2 d降水	前3 d降水	前4 d降水
灾害是否发生	0.451**	0.318**	0.235**	0.181**	0.130**
累积降水因子	前5 d降水	前6 d降水			
灾害是否发生	0.163**	0.015*			

注: **表示在0.01显著性水平上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

表3 灾害发生前3 d降水量与灾害逻辑回归分类

Table 3 Logistic regression classification of precipitation and disaster in three days before disaster

	已观测	已预测			
		发生否			
		0	1	百分比矫正	
步骤1	发生否	0	1221	157	8.6
	发生是	1	410	1029	71.5
	总计百分比				80.1

表4 灾害发生前3 d降水量与灾害逻辑回归结果

Table 4 Results of logistic regression between precipitation and disaster in three days before disaster

	当日降水	前1 d降水	前2 d降水	常量
B	0.048	0.031	0.029	-1.337
Sig	0	0	0	0

$$Y = \frac{\sqrt{0.048D_0 + 0.031D_1 + 0.029D_2 - 1.337}}{1 + \sqrt{0.048D_0 + 0.031D_1 + 0.029D_2 - 1.337}}, \quad (5)$$

式中: Y 为降水诱发滑坡灾害发生概率值, D_0 为灾害当日的降水量, D_1 为灾害发生前1 d的降水量, D_2 为灾害发生前2 d的降水量。

根据现有灾害点记录,按照易发性区图(图3)划分为四组,分别针对灾害发生当日降水、前3 d累积降水和前3 d有效降水得到基于不同易发性程度诱发灾害的临界雨量表(表5~表7)。其中,前期有效降水是指滑坡灾害发生前对固态补给物质的含水状况仍起作用的降水量^[31],为了表示固态补给物质的实际含水率,可采用式(6)计算有效降水量 R_n :

$$R_n = R_0 + KR_1 + K^2R_2 + \dots + K^nR_n, \quad (6)$$

式中: R_n 为滑坡灾害发生前 $n+1$ 天的逐日降水量,单位为mm; K 为递减系数,一般取值为0.8左右^[32],可根据天气状况的不同而修改合适的 K 值,本文取 $K=0.8$ 计算前3 d有效降水量。

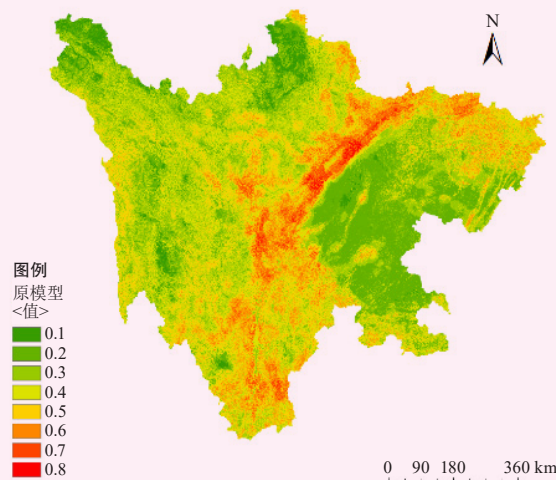


图3 四川省易发性区划图

Fig. 3 Zoning map of vulnerability of Sichuan Province

表5 川东临界雨量统计图

Table 5 Statistical chart of critical rainfall in Eastern Sichuan

H值 \ 当日降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<46.9	46.9	98.9	142.1
0.3 < H ≤ 0.4	<41.4	41.4	90.6	130.2
0.4 < H ≤ 0.5	<39.4	39.4	84.5	120.9
0.5 < H ≤ 0.6	<36.8	36.8	77.8	110.3
0.6 < H ≤ 0.8	<32.4	32.4	70.4	100
同时满足				
H值 \ 3 d 累积降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<72.2	72.2	200.8	329.4
0.3 < H ≤ 0.4	<67.6	67.6	190.5	312.8
0.4 < H ≤ 0.5	<64.4	64.4	185	305.3
0.5 < H ≤ 0.6	<59.0	59.0	171.5	293.4
0.6 < H ≤ 0.8	<55.3	55.3	160.5	277.4
同时满足				
H值 \ 3 d 有效降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<64.7	64.7	166.5	260.4
0.3 < H ≤ 0.4	<57.9	57.9	158.2	253.8
0.4 < H ≤ 0.5	<55.7	55.7	148.4	241.9
0.5 < H ≤ 0.6	<52.7	52.7	120.2	228.4
0.6 < H ≤ 0.8	<48.2	48.2	107.2	202.3

表6 川西临界雨量统计图

Table 6 Statistical chart of critical rainfall in Western Sichuan

H值 \ 当日降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<16.0	16.0	39.0	70.2
0.3 < H ≤ 0.4	<15.2	15.2	35.8	59.8
0.4 < H ≤ 0.5	<15.0	15.0	31.9	48.7
0.5 < H ≤ 0.6	<13.3	13.3	29.6	38.8
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/
同时满足				
H值 \ 3 d 累积降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<35.8	35.8	83.2	136.8
0.3 < H ≤ 0.4	<35.4	35.4	78.9	111.9
0.4 < H ≤ 0.5	<30.2	30.2	72.9	101.1
0.5 < H ≤ 0.6	<23.4	23.4	60.3	88.9
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/
同时满足				
H值 \ 3 d 有效降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	<28.9	28.9	78.8	110.6
0.3 < H ≤ 0.4	<25.5	25.5	65.8	93.3
0.4 < H ≤ 0.5	<20.6	20.6	55.1	83.4
0.5 < H ≤ 0.6	<19.3	19.3	48.0	78.4
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/

表7 川西南临界雨量统计图

Table 7 Statistical chart of critical rainfall in Southwest Sichuan

H值 \ 当日降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	/	/	/	/
0.3 < H ≤ 0.4	<21.4	21.4	53.7	128.9
0.4 < H ≤ 0.5	<17.5	17.5	45.5	93.9
0.5 < H ≤ 0.6	<16.9	16.9	36.6	75.1
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/
同时满足				
H值 \ 3 d 累积降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	/	/	/	/
0.3 < H ≤ 0.4	<46.5	46.5	123.3	182.0
0.4 < H ≤ 0.5	<40.5	40.5	103.8	150.8
0.5 < H ≤ 0.6	<32.3	32.3	91.5	126.2
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/
同时满足				
H值 \ 3 d 有效降水	非预报	黄色预报	橙色预报	红色预报
0.2 < H ≤ 0.3	/	/	/	/
0.3 < H ≤ 0.4	<37.7	37.7	81.9	149.6
0.4 < H ≤ 0.5	<33.3	33.3	69.3	109.0
0.5 < H ≤ 0.6	<28.3	28.3	56.1	87.6
0.6 < H ≤ 0.8	/	/	/	/

结果表明，易发性区划不同，临界雨量也不同。川东地区地势比较平坦，临界雨量较大；川西地区地势条件复杂，海拔较高，雨量站分布不均，雨量站测量的山底河谷降水可能与高山降水情况有差异，临界雨量的结果普遍偏小；川西南地区地势情况介于川东和川西之间，结合多年实际工作经验以及统计数据可得，川西南临界雨量的结果介于川东和川西之间。

4 精细化分区域灾害预报模型

基于前期费晓燕等^[33]对四川省降水诱发滑坡灾害的气象预警模型的研究，本文继续沿用其模型构建思路，以易发性概率值 H 为基础，与降水诱发滑坡灾害的发生概率 Y 进行逻辑回归分析，得出滑坡灾害发生的概率。针对川东、川西和川西南三个区域分别进行 Y 与 H 的逻辑回归分析，确定出 Y 与 H 的关系如下：

$$T = \alpha H + \beta Y, \quad (6)$$

式中： T 为滑坡灾害发生概率值， H 为易发性概率值， Y 为降水诱发滑坡灾害的发生概率值， α 为单元易发性概率占滑坡灾害发生概率的权重， β 为降水因素的发生概率占滑坡灾害发生概率的权重系数。其中，川东地区 $\alpha=0.249$ ， $\beta=0.751$ ；川西地区 $\alpha=0.655$ ， $\beta=0.345$ ；川西南地区 $\alpha=0.501$ ， $\beta=0.499$ 。

5 延伸期-月尺度滑坡灾害气象预报模型检验

为确保滑坡灾害预报的准确性,首先通过临界雨量表(表5~表7)判断降水量是否满足预报条件,在满足预报条件后将其代入灾害预报模型 T 中进行计算。由于地质背景易发性概率值 H 和降水诱发滑坡灾害的发生概率值 Y 的范围在 $0\sim 0.8$,因此根据经验和实际预报效果对滑坡灾害发生概率值 T 进行了划分,确定 T 值超过 0.32 发布黄色预报信号,超过 0.48 发布橙色预报信号,超过 0.64 发布红色预报信号。

目前来说,延伸期逐日预报难度很大。研究表明,延伸期预报时效理论上一般为 14 d ^[34],且国际上主流的数值模式大多只能达到 10 d 左右的预报水平^[35],欧洲中期天气预报中心(ECMWF)也主要是提供 10 d 的中期数值预报产品。近年来,新一代气候预测模式的出现使得模式资料的预报水准大大提升,其中CFSv2可以提供未来 $0\sim 45\text{ d}$ 的预报产品。这种模式产品在延伸期预报中有着广泛的应用,但在滑坡灾害气象预报相关研究中的应用较少。CFSv2原始网格的分辨率为 $0.9^\circ\times 0.9^\circ$,且CFSv2预报产品具有较长时间的历史回报、实时更新预报等预报优势^[36]。因此,本文利用2020年8月1日的CFSv2逐日降水预报产品,以2020年8月11日四川省雅安市、绵阳市、广元市发生的群发滑坡灾害为例,验证滑坡灾害气象预报模型在延伸期-月尺度中的应用效果。雅安市、绵阳市、广元市一带在8月9—11日连续3 d有强降水,8月10日降水量最大值为 55.68 mm ,8月11日降水量最大值为 41.7 mm ,将3 d降水量带入模型计算得出2020年8月11日地质灾害预报模型结果。根据统计,2020年8月11日滑坡灾害点有303个,其中达到黄色预报级别的滑坡灾害点有294个,占灾害比例的97.03%,对于

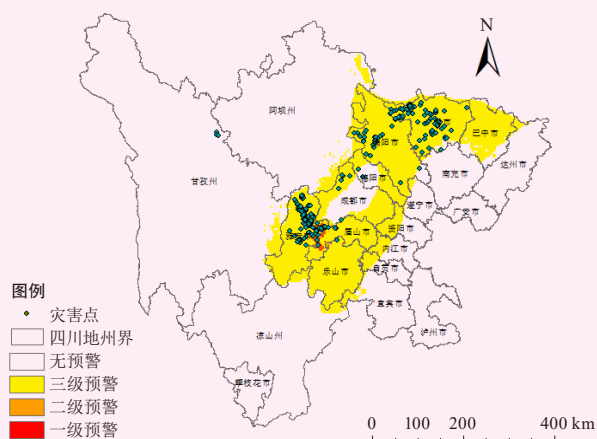


图4 2020年8月11日滑坡灾害预报模型结果

Fig. 4 Results of landslide disaster prediction model on 11 August 2020

重大滑坡灾害点,所有滑坡灾害点均达到黄色预报级别,因此,本次个例的预报准确率为97.03%,漏报率为2.97%。至此,本文认为模型的整体预报准确性较高,对于延伸期滑坡灾害整体有较好的预报效果。

6 结论

1) 通过研究滑坡灾害与日降水量的关系发现,灾害发生的可能性与降水量成正比,且灾害发生在最大降水日当日和后1 d的可能性最大,表明前期降水对灾害的影响很大,且滑坡灾害的发生与强降雨在时间上既存在一致的情况,也存在滞后的情况。

2) 对四川省滑坡灾害与其延伸期降水量之间相关性研究的结果表明,灾害发生当日、前1 d和前2 d的降水量对于滑坡灾害发生的影响较大,其降水量权重值分别为0.048、0.031和0.029。

3) 分别对川东、川西、川西南三个区域进行滑坡灾害发生概率分析,其易发性概率值与降水诱发滑坡灾害发生概率值分别为0.249和0.751, 0.655和0.345, 0.501和0.499。同时,对三个区域的临界雨量进行分析的结果表明,易发性区划不同,临界雨量也不同,川东地区临界雨量值最大,川西南地区次之,川西地区最小。

4) 在构建四川省滑坡灾害气象预报模型后,验证其在延伸期-月尺度中的应用效果,利用2020年8月1日的CFSv2数据预报2020年8月11日的群发滑坡灾害,结果表明,模型对于延伸期滑坡灾害整体有较好的预报效果。

由于上报的灾害点坐标由人工定位,与灾害发生的实际位置有偏差,且灾害点的降水量受气象站点分布的影响,气象站点及CFSv2降水数据很难完全代表实际降水量,尤其是CFSv2模式降水数据的精度有待提高,其会直接影响滑坡灾害气象预报模型在延伸期-月尺度中的应用效果;另外,本文在降水因子中仅考虑了灾害前2 d降水,未考虑对灾害有明显影响的小时雨量,因此今后有必要对滑坡灾害与更细时间尺度降水关系进行研究。

参考文献

- [1] 朱晚霞, 张力, 杨树文. 降水引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降水量预测. 中国滑坡灾害与防治报, 2019, 30(4): 24-31.
- [2] 吴正华. 北京泥石流灾害及其降水触发条件. 水土保持研究, 2001, (1): 67-72.
- [3] 周国兵, 马力, 廖代强. 重庆市山体滑坡气象条件等级预报业务系统. 应用气象学报, 2003, (1): 122-124.
- [4] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降水的耦合关系研究. 灾害学, 2001, (2): 88-93.
- [5] 李立. 基于GIS的小流域山洪灾害临界雨量研究. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 248-252.
- [6] 王洁, 赵荣飞, 张舒宁, 等. 集安市小流域山洪灾害临界雨量分析. 水利规划与设计, 2018, (9): 56-59, 160.
- [7] 李明波, 王心悦, 陈植华, 等. 湖南雪峰山地区降水型滑坡灾害临

- 界雨量及预警区划分析. 甘肃科学学报, 2019, 31(6): 62-67.
- [8] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发滑坡灾害降水分型及阈值分析. 灾害学, 2019, 34(1): 62-67, 93.
- [9] 李忠燕, 田其博, 张东海, 等. 遵义市不同滑坡灾害易发区滑坡临界雨量研究. 水土保持通报, 2018, 38(6): 217-223, 239.
- [10] 付世军, 文敏. 南充市强降雨诱发滑坡灾害风险预警技术研究. 现代农业科技, 2018, (6): 189-192.
- [11] 覃江涛. 大新县城区内涝点临界雨量预警阈值研究. 广西水利水电, 2020, (1): 116-118.
- [12] 刘晓燕, 李晓宇, 高云飞, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降水阈值变化. 水利学报, 2019, 50(10): 1177-1188.
- [13] 杨宗佳, 王礼勇, 石莉莉, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 272-285.
- [14] 官清华, 黄光庆, 张俊香. 广东省小流域地区降水诱发的滑坡灾害预警体系探讨. 气象科技进展, 2015, 5(4): 53-56.
- [15] Glade T, Crozier M J, Smith P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "antecedent daily rainfall model". Pure and Applied Geophysics, 2000, 157 (6/8): 1059-1079.
- [16] 钟荫乾. 滑坡与降水关系及其预报. 中国滑坡灾害与防治学报, 1998, 9(4): 81-86.
- [17] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降水的耦合关系研究. 灾害学, 2001, 16(2): 87-92.
- [18] 李德心, 何思明, 朱兴华, 等. 前期有效降水对滑坡启动影响分析. 灾害学, 2011, 26(3): 41-45.
- [19] 马超, 胡凯衡, 赵晋恒, 等. 震后泥石流的激发雨量特征——以汶川地震和集集地震后泥石流为例. 灾害学, 2013, 28(4): 89-94.
- [20] 铁永波, 周洪福, 倪俊勇. 西南山区短时强降雨诱发低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例. 灾害学, 2013, 28(4): 110-113.
- [21] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降水强度和逻辑回归的降水型滑坡预测模型. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 156-162, 172.
- [22] 林巍, 李远耀, 徐勇, 等. 武陵山区湘西北滑坡灾害临界降水量阈值研究. 长江科学院院报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190214.1447.004.html>.
- [23] 叶殿秀, 陈鲜艳, 张强, 等. 1971—2003年三峡库区诱发滑坡的临界降水阈值初探. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1289-1294.
- [24] 李宇梅, 狄靖月, 许凤雯, 等. 基于当日临界雨量的国家级滑坡灾害风险预警方法. 气象科技进展, 2018, 8(3): 77-83.
- [25] 沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于TRMM降水数据的四川省滑坡灾害降水阈值分析. 灾害学, 2015, 30(2): 220-227.
- [26] 李铁锋, 丛威青. 基于Logistic回归及前期有效雨量的降水诱发型滑坡预测方法. 中国滑坡灾害与防治学报, 2006, 17(1): 33-35.
- [27] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降水型滑坡预报模型. 中国滑坡灾害与防治学报, 2013, 24(3): 32-37.
- [28] 唐春燕, 杨芳. 南溪区山洪滑坡灾害特征分析与预警指标探究. 南方农业, 2018, 12(21): 156-158.
- [29] 张锡涛, 刘翔宇, 谢谟文, 等. 基于岩质滑坡引发泥石流的影响范围评价模型. 工程地质学报, 2013, 21(4): 598-606.
- [30] 常鸣, 唐川, 苏永超, 等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积扇危险范围预测模型. 工程地质学报, 2012, 20(6): 971-978.
- [31] 余峙丹, 张辉, 郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因. 气象科技, 2010, 38(1): 136-140.
- [32] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法. 北京: 气象出版社, 2014: 56-60.
- [33] 费晓燕, 柳锦宝, 屈伯强, 等. 四川省降水诱发滑坡灾害的气象预警模型. 水土保持通报, 2017, 37(5): 315-321, 327.
- [34] 郑志海. 月动力延伸预报研究进展回顾. 气象科技进展, 2013, 3(1): 25-30.
- [35] 马浩, 郑志海, 李正泉, 等. 15-30 d延伸期逐日预报在线显示平台的设计与实现. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(4): 78-85.
- [36] 周辰光, 杜良敏, 高伟, 等. CFSv2在湖北省梅雨特征量延伸期预报中的应用. 暴雨灾害, 2020, 39(2): 185-191.

(上接121页)

- [6] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, (4): 123-129.
- [7] 王可法, 张卉慧, 张伟, 等. Parsivel激光雨滴谱仪观测降水中异常数据的判别及处理. 气象科学, 2011, 31(6): 732-736.
- [8] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165-166.
- [9] Takeuchi D M. Characterization of raindrop size distributions. In: Cloud Physics and Atmospheric Electricity. Issaquah: American Meteorological Society, 1978: 154-161
- [10] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(10): 1764-1775.
- [11] Willis P T. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(9): 1648-1661.
- [12] 熊飞麟. 拟合Gamma分布雨滴谱的研究. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [13] 霍朝阳, 阮征, 魏鸣, 等. 雨滴谱Gamma函数拟合方法的分析与评估. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 1-10.
- [14] 张洪胜, 何宏让, 张云, 等. 南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析. 气象与环境学, 2017, 40(3): 71-78.
- [15] 于建宇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 青藏高原那曲地区云降水微观特征雨滴谱分析. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(2): 188-194.
- [16] Mehta S, Singh S, Mitra A, et al. Modeling of raindrop size distribution observed using micro rain radar over Darjeeling (27.05°N, 88.26°E): an Eastern Himalayan Region. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(1): 2959-2976.
- [17] 潘晓, 傅云飞. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析. 高原气象, 2015, 34(5): 1191-1203.
- [18] 常伟. 青藏高原那曲地区夏季云微物理特征和降水形成机制的飞机观测研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [19] 杨俊梅, 王星星, 封秋娟, 等. 山西汾阳地区层状云和对流云降水雨滴谱特征. 干旱气象, 2017, 35(3): 439-445.
- [20] 傅云飞, 潘晓, 刘国胜, 等. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究. 大气科学, 2016, 40(1): 102-120.
- [21] 柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等. 成都地区雨滴谱特征. 应用气象学报, 2015, 26(1): 112-121.
- [22] 李腹广, 王芬. 用天气雷达回波强度资料估测降水. 气象科技, 2007(2): 286-288.
- [23] 刘红燕, 雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征. 大气科学, 2006(4): 693-702.
- [24] 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征. 高原气象, 2020, 39(5): 899-911.
- [25] Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over North Taiwan. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(20): 11, 602-11, 624.
- [26] Wu Z, Zhang Y, Zhang L, et al. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of Western Pacific. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2019, 124(7): 4054-4073.
- [27] Wen L, Zhao K, Wang M, et al. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(4): 346-362.
- [28] 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用. 大气科学, 2019, 43(3): 691-704.
- [29] Wang Y, Zheng J, Cheng Z, et al. Characteristics of raindrop size distribution on the Eastern slope of the Tibetan Plateau in summer. Atmosphere, 2020, 11(6): 562.