

四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型

费晓燕^{1,2}, 柳锦宝^{1,2}, 屈伯强³, 刘志红¹, 王增武¹

(1. 成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 城市空间信息工程
北京市重点实验室, 北京 100038; 3. 四川省地质环境监测总站, 四川 成都 610081)

摘要: [目的] 分析四川省 2008—2014 年的滑坡灾害与前期降雨量间的关系, 构建降雨诱发滑坡灾害气象预警模型, 优化模型的权重参数, 为四川省滑坡灾害预警工作提供有效参考。[方法] 基于降雨信息资料, 对四川省滑坡灾害的前期雨量进行统计分析, 并采用逻辑回归分析分别计算和优化灾害的前期综合日降雨量间的权重关系和气象预警模型中地质环境背景值与降雨诱发灾害概率值的权重系数。[结果] 滑坡灾害的当日降雨量、前一日降雨量和前两日降雨量对灾害的影响权重分别为 0.587, 0.220, 0.189, 气象预警模型的地质背景概率和综合雨量概率的权重参数分别为 0.394, 0.606。根据以上研究构建灾害气象预警模型, 利用已有灾害点对其进行验证, 证得模型的整体准确率为 78.36%, 进而通过 2013 年 7 月 10 日的群发滑坡灾害个例对模型进行检验, 检验结果良好。[结论] 该模型预警效果良好, 精确度较高, 能为相关部门提供的防灾减灾参考。

关键词: 四川省; 降雨; 滑坡; 气象预警模型; 逻辑回归分析

文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2017)05-0315-07 **中图分类号:** P426.616, P642.22, O242.1

文献参数: 费晓燕, 柳锦宝, 屈伯强, 等. 四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 315-321. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.053; Fei Xiaoyan, Liu Jinbao, Qu Boqiang, et al. Meteorologic early-warning model for rainfall-induced landslide disasters in Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 315-321. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.053

Meteorologic Early-warning Model for Rainfall-induced Landslide Disasters in Sichuan Province

FEI Xiaoyan^{1,2}, LIU Jinbao^{1,2}, QU Boqiang³, LIU Zhihong¹, WANG Zengwu¹

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100038, China; 3. Sichuan Province Geological Environment Monitoring Station, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: [Objective] The relation between landslide hazards and antecedent rainfall in 2008 to 2014 was analyzed. A meteorological early-warning model for the rainfall-induced landslide hazards was established and the weight coefficients of the model were optimized in order to provide an efficient reference for disaster warning. [Methods] Through statistical analysis of the antecedent rainfall based on the precipitation information, we adopted logistic regression analysis to calculate the weights of daily rainfall and optimize the weight coefficients of the model. [Results] The weights of disaster-occurring day rainfall, the 2-day and the 3-day rainfall before landslide disaster are 0.587, 0.220 and 0.189. The weight coefficients of the model for geological background and rainfall are 0.394 and 0.606. The previously occurred disasters were used to test and verify the model and the accuracy is 78.36%. The massively occurred disasters were also taken in July 10, 2013 as a single example to verify the model and the result is rather good. [Conclusion] The model has

收稿日期: 2017-03-28

修回日期: 2017-04-25

资助项目: 四川省国土资源厅科学研究计划(KJ-2015-18); 四川省应急测绘与防灾减灾工程技术研究中心开放基金资助项目(K2014B002); 数字制图与国土信息应用工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(DM2014SC01); 四川省高校人文社会科学重点研究基地“气象灾害预测预警与应急管理研究中心”开放课题(ZHYJ15-YB09); 城市空间信息工程北京市重点实验室经费资助项目(2014202)

第一作者: 费晓燕(1992—), 女(汉族), 山东省日照市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: feixiaoyan921013@163.com。

通讯作者: 柳锦宝(1979—), 男(汉族), 湖北省黄梅县人, 博士, 副教授, 从事地球探测信息技术研究。E-mail: liujinbao1107@163.com。

good early warning effect, so as to provide an efficient reference for the disaster prevention and mitigation.

Keywords: Sichuan Province; rainfall; landslide; meteorologic early-warning model; logistic regression analysis

根据大量文献调研显示,四川省为西南地区地质灾害最为发育的省份。受青藏高原地形影响,省内地形差异较大,地质构造活跃,地震频发,为地质灾害的频发提供了基础地质条件;此外,受青藏高原的阻挡作用,降雨充沛而集中,成为诱发地质灾害发生的主要因素。四川省地质灾害具有点多、面广、规模大、成灾快、暴发频率高、延续时间长的特点^[1]。2008年以来,四川省先后经历了“5·12”汶川特大地震、“8·13”特大山洪泥石流、“4·20”芦山强烈地震和“7·9”特大暴雨洪灾、“9·13”川东北特大暴雨洪灾和“11·22”康定地震等多次重大自然灾害侵袭,据统计,截止到2015年,共发生以滑坡、泥石流和崩塌为主的地质灾害13800余次。因此,面对如此多的地质灾害,需要精准、及时的预警手段进行防灾减灾。根据研究刘传正等^[2],梁润娥等^[3]对国内外区域地质灾害气象预警原理研究和应用状况的综合分析,将地质灾害气象预警模型发展总结为3代,第一代隐式统计模型是通过界定临界雨量值进行灾害预警,但仅凭临界雨量很难准确反映地质环境的变化以及灾害诱发规律;第二代显式预警模型是耦合了地质环境背景与降雨参数的综合显式模型,充分体现地质环境与气象条件对灾害的影响程度。综合显式模型无论在模型原理、空间精度和升级能力上还是研究需求条件上都能体现其优越性,也是现阶段国内最常用的地质灾害预警模型^[4]。降雨是诱发灾害的主要因素之一,灾害的发生与当日及前期降雨都有密切联系,在前期降雨充沛的条件下,无论当日降雨量或小或大都能够引发灾害^[5],因此,根据前期降雨构建降雨诱发灾害模型十分必要。陈景武等^[6]在云南蒋家沟泥石流观测研究中考虑了前期间接雨量,取20d前的降雨作为一般暴雨型泥石流的前期间接雨量,10d前的降雨作为大暴雨型泥石流的前期间接雨量;文科军等^[7]构建泥石流判别模型中使用灾害当日激发雨量与前15d实效雨量。Logistic回归分析常用于滑坡灾害的评价方面,而在降雨诱发滑坡中的应用较少,李铁锋等^[8]应用Logistic回归分析与前期降雨量结合定量分析降雨诱发灾害的可能性。

为加强突发地质灾害的应急防治能力建设,自2003年以来,四川省已开展全省汛期地质灾害气象预警预报工作。随着预警预报技术研究的不断进步,四川省的地质灾害气象预警预报模型也应及时优化改进。本研究拟以Logistic回归分析与前期雨量结

合构建气象预警模型,优化模型权重参数,提高其预警准确度,以期为政府决策提供有效参考。

1 数据及研究方法介绍

1.1 数据源及预处理

本次研究的地质灾害资料由四川省地质环境监测总站提供,灾害数据为2008—2014年的实际滑坡灾害点共8900余个,其属性信息包括地理坐标、灾害发生日期及灾害规模等;基础降雨资料由四川省气象台提供,降雨资料为2008—2014年共4000余个省自动气象站和加密气象站的小时降雨数据。

本研究对灾害资料的预处理包括整理核实灾害点的属性信息,检验地理坐标准确性,修改或删除不详的数据;对气象数据的预处理包括剔除缺测、误测的气象数据,并对由于迁站、撤站、新建站等原因造成的数据量较少的站点进行筛选,剔除全年数据量不足150d的气象站数据,将筛选后的气象数据整理计算获得每个气象站的日降水数据。

1.2 研究方法及技术

(1) Logistic回归模型。Logistic模型是针对二分类或多分类响应变量建立的回归模型^[9]。在国外,Gorsevski等^[10]较早将Logistic回归分析与GIS结合应用于滑坡灾害的预测,在国内Logistic回归模型也广泛应用于各类地质灾害区划研究中。Logistic模型所需假设简单,对识别变量的分布无要求,大大拓宽了模型的应用面和灵活性^[11]。在地质灾害问题中,由于灾害的影响因子不是连续变量,线性回归不适用于推导其之间的关系,而逻辑回归分析则能合理解决该问题。以各影响因子数据作为自变量,灾害的发生与否作为因变量(0代表灾害不发生,1代表灾害发生)^[12]。设 P 为灾害发生的概率为因变量,取值范围^[0,1],灾害影响因子集即 X_1, X_2, \dots, X_n 为自变量,建立回归方程:

$$\text{Logit}P = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n \quad (1)$$

式中: B_1, B_2, \dots, B_n ——逻辑回归系数。对于包含一个以上自变量的Logistic回归的分类概率方程为:

$$\begin{cases} P = \frac{e^Z}{1+e^Z} \\ Z = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n \end{cases} \quad (2)$$

因此,滑坡灾害影响因子权重问题转化为利用已知的历史滑坡空间分布求算逻辑回归系数 B_1, B_2, \dots, B_n 的问题。

(2) 预警等级设置。为保证预警效果合理、准

确、实用,根据四川省地质环境监测总站多年的地质灾害预警习惯,根据单元地质灾害易发性预报概率(T),将存在地质灾害发生概率的地质灾害气象预警等级分为以下 3 级。

① 1 级预警。1 级预警发布红色预警信号,表示该地区在当前预报雨量情况下极易发生地质灾害,起警报作用,提醒相关人员和部门及时做好防御措施;

② 2 级预警。2 级预警发布橙色预警信号,表示该地区在当前预报雨量情况下容易发生地质灾害,起注意作用,提醒预报人员及各级政府关注降雨动态变化;

③ 3 级预警。3 级预警发布黄色预警信号,表示该地区在当前预报雨量情况下很有可能发生地质灾害,对预报及政府各部门起提醒作用。

(3) 降水概率化。在利用降雨量进行逻辑回归计算时,需要将降雨量进行概率量化,将数量值归到 0~1 之间。四川省降雨分布复杂多变,本研究根据宋光齐对四川省降雨信息因素的概率量化的研究,将降雨量分为 6 个等级,通过建立线性回归方程量化降雨量^[13](如表 1 所示)。

表 1 各等级雨量概率量化取值范围及线性方程

降雨量等级(x)	雨量概率取值范围	线性回归方程(y)
0~10 mm	0.1~0.2	$y=0.01x+0.1$
10~25 mm	0.2~0.3	$y=0.0067x+0.13333$
25~50 mm	0.3~0.4	$y=0.004x+0.2$
50~100 mm	0.4~0.5	$y=0.002x+0.3$
100~150 mm	0.5~0.8	$y=0.006x-0.1$
>150 mm	0.8	$y=0.8$

2 滑坡灾害诱发与降雨量关系

降雨型滑坡是世界上分布最广,发生频率最高的滑坡类型,是滑坡灾害的主要研究对象^[14]。由于降雨自身的规律性、可预测性,气象预警成为目前在地质灾害区域预警预报的重要手段。在大多数预警评价中,降雨因子较多作为静态因子投入到灾害模型中

进行评价^[15],其预警精度较低。通过前人研究可知,滑坡灾害的发生与当日及前期降雨量均有较大相关性,因此,本研究通过探究滑坡与前期雨量的关系为构建气象模型提供思路。

历史滑坡点降水数据的提取是统计分析的关键,在前人研究中,历史灾害点的气象数据往往通过空间插值的方法获取,但其结果并不精确;因此,本研究利用 GIS 邻域分析功能,将历史滑坡灾害点与自动或加密气象站关联,获取最临近气象站点的前期降水资料(包括灾害当日及前 5 d 的日降水资料),共得到有效降水数据的历史灾害点记录 8 226 条(有效降雨记录是指灾害当日或前 5 d 至少有 1 日降雨量大于 0 mm 的灾害点记录)对滑坡灾害降雨记录进行统计。

2.1 滑坡灾害的降雨雨型分析

(1) 滑坡当日及前 5 d 降雨量最大值分布。如图 1 所示,有 52.4% 的滑坡灾害发生在降雨量最大的当日,24.5% 的滑坡灾害发生在 6 d 内降雨量最大值的第 2 d,随日期向后推移,滑坡灾害发生在最大降雨日的概率越小,最大降雨后的第 4,5 d 滑坡灾害发生的概率不超过 6%。因此可以得出结论:滑坡灾害发生在最大降雨日当日和后一日的可能性最大,发生在最大降雨日当日的可能性大于后一日。

(2) 滑坡灾害发生在最大降雨日时的降雨量。如图 1 所示,灾点数量随降雨量的增大而增大。23.1% 的滑坡灾害点当日降雨量在 100~150 mm 范围内,32.7% 的灾害点当日降雨量大于 150 mm。因此得出结论,随降雨量增大,灾害发生的可能性越大。

(3) 滑坡灾害发生于最大降雨量后一日时的日降雨量。如图 1 所示,44.4% 的灾害的最大降雨量超过 150 mm,与灾害发生在最大降雨日当日相比,上升了 11.7%,有 19.5% 的滑坡灾害最大降雨量在 100~150 mm 范围内,与灾害发生在最大降雨日当日相比减小 3.6%,由此可以得出结论,滑坡灾害发生前一日有较大概率发生大暴雨,灾害的发生与强降雨在时间上有一定滞后性。

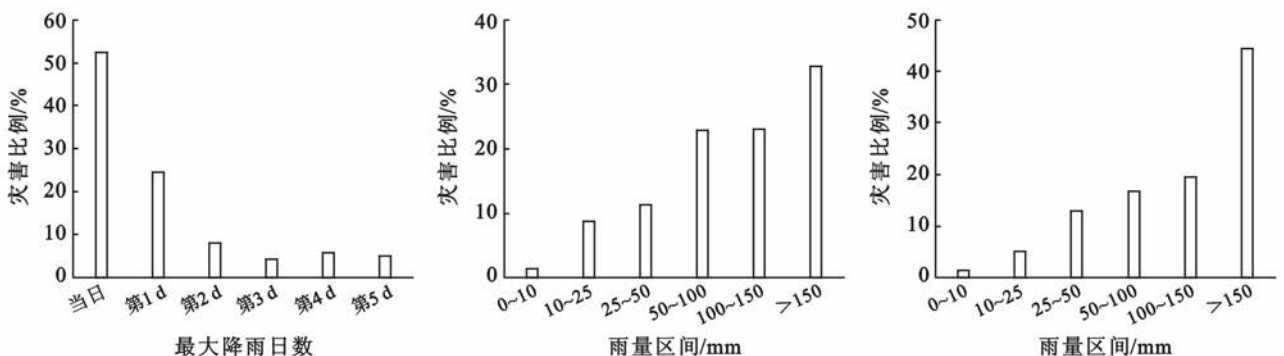


图 1 滑坡灾害最大降雨日数分布与滑坡发生于最大降雨量当日及前一日的雨量分布

(4) 灾害发生在最大降雨量当日及灾害之后一日的 6 d 累积降雨量。如图 2 所示,滑坡发生在最大降雨当日的滑坡 6 d 累积降水量相对较小,主要集中在 300 mm 以内,仅有 23.5% 的滑坡灾害 6 d 累积降水超过 300 mm 以上,累积降水量超过 500 mm 降雨量的滑坡灾害仅占 8.6%;滑坡发生在最大降雨后一日的累积降雨量相比最大降雨日当日累积雨量在 500 mm 以下的灾害数比例均减小,在 500 mm 以上范围内灾害比例增大,因此得出结论:当滑坡灾害当

日降水量很大时,滑坡灾害发生与强降雨在时间上有一致性,但滑坡发生 6 d 内的累积降水相对较小;当最大降水量相对较小,但滑坡 6 d 内累计降水量相对较大时,滑坡灾害的发生与强降雨发生时间相较略有滞后。

通过以上统计资料可以判断出,四川省滑坡灾害既有即雨即滑的状况,也存在滞后型的滑坡灾害情况,因此,可根据灾害与前期降雨量关系建立降雨诱发灾害模型。

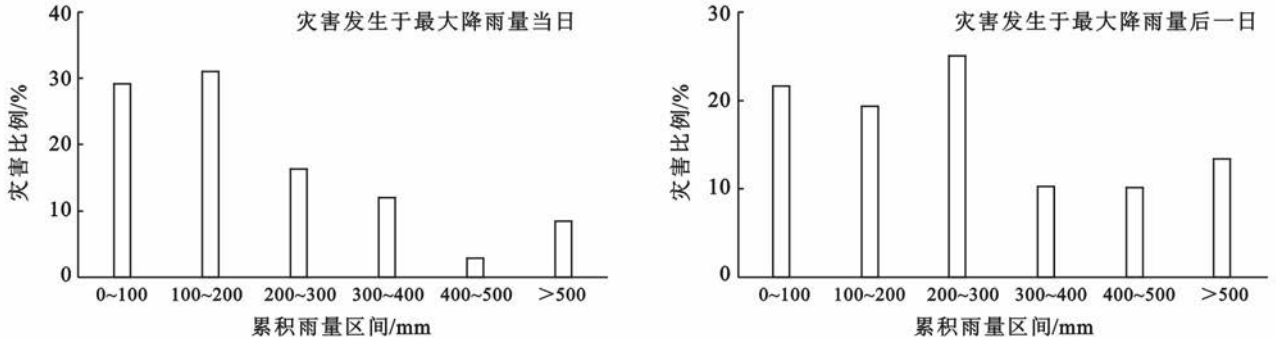


图 2 灾害发生于最大降雨量当日及其后一日时的 6 d 累积降雨量

2.2 滑坡灾害与日降雨量关系

通过统计滑坡灾害发生当日日降雨量的分布状况(图 3)发现,当日降雨量大于等于 5 mm 时,灾害当日降雨量分布呈阶梯状上升,当日降雨越大,灾害发生的比例越高,当日降水量大于等于 150 mm 时,灾害频次为 1 763 次。通过统计灾害发生当日及前期雨量对灾害的贡献率发现(如图 3 所示),在当日贡献

率中,有超过 66% 的灾害点当日降雨贡献率占总贡献率的 30% 以上,有 18% 的灾害点当日降雨贡献率超总贡献率 80% 以上;在前一日贡献率中,有 34% 的灾害点前一日贡献率占总贡献率 30% 以上,滑坡灾害次数随降水量贡献率增大而减少,随着时间向后推移,贡献率大的灾害点数量急剧降低,因此,说明四川省滑坡灾害与前几日降水有一定的关系,但是相关性较小。

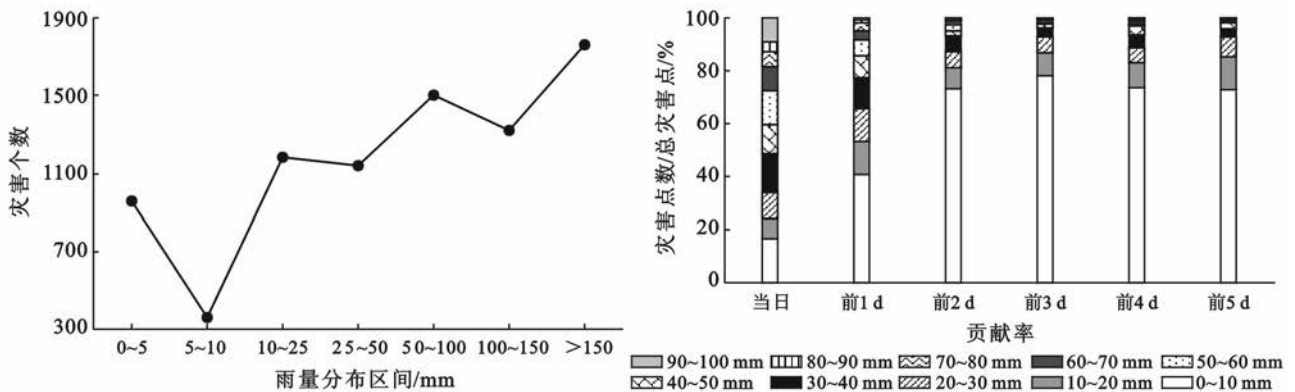


图 3 灾害当日雨量分布与 6 d 雨量对灾害贡献率分布

根据以上分析,基本掌握了四川省滑坡灾害的降雨分布规律和灾害与雨量的关系。在降雨强度较大时,会出现即雨即滑现象,而当降雨在强度不大但在时间上有一定持续性时,滑坡灾害也会在雨量累积到一定程度后发生;滑坡灾害与当日降雨量相关性最

大,与前几日降雨有一定相关性。因此,为保证模型研究效果,本研究决定使用灾害当日雨量及前 5 d 雨量作为致灾因子建立降雨诱发地质灾害模型。

2.3 降雨诱发地质灾害发生概率 Y

各个地区降水对滑坡的影响程度不同,本研究引

入“综合雨量”概念,进一步研究降雨对灾害的影响程度。综合雨量是指对当日灾害形成有影响的降雨过程中的等效降雨量,其值为前期过程降雨及灾害当日降雨量与其影响系数乘积之和^[15]。其计算模型为:

$$R_c = \alpha R_0 + \beta R_1 + \gamma R_2 + \dots + \omega R_n \quad (3)$$

式中: R_c ——综合雨量(mm); R_0 ——当日降雨量(mm); R_n —— n 天前降雨量(mm); $\alpha, \beta, \gamma, \omega$ ——综合雨量权重系数^[15]。在一般研究中,降雨量的权重系数大多采用经验系数,如何因地制宜的确定雨量权重系数是建立灾害模型的关键,前文介绍的逻辑回归模型相对于其他半定量模型具有假设简单,不要求自变量为正态分布,并且考虑统计因子之间的相互影响,可自动剔除影响小的因子等优势,是地质灾害研究中较为常用的分析模型^[16-17]。本研究选取逻辑回归模型确定降雨量权重系数,充分地将对客观分析和主观判断相结合,使降水诱发灾害模型更适用于研究区,也有利于提高模型精度。

为防止误差,本研究基于滑坡灾害资料和降水资料,剔除日降雨量小于5 mm的记录,以筛选后的滑

坡灾害点作为样本,以地质灾害是否发生为因变量,经概率化的日降雨量(包含当日降雨量与前5 d日降雨量)为自变量,并加入同样数量的未发生灾害点的样本,构建逻辑回归模型。考虑到未发生灾害点不具备时间信息,因此需要为未发生样本点分配日期,日期分配方式是选取2008—2014年中,汛期(6—10月)内灾害发生密度较大的时间段内未发生灾害的日期,随机分配给随机样本。为保证结果正确性,避免随机误差,本研究选取了4组随机点,分别建立4次二元逻辑回归模型(表2),经拟合,前3,4,5 d概率化降水量均未通过显著性检验,遂剔除,利用灾害前2 d及当日的雨量作为自变量重新建模。经拟合,4组逻辑回归模型的-2对数似然值变化较稳定,模型拟合度较高;各因子均通过检验,模型整体预测的平均准确率达93.1%。因此,获得各自变量的逻辑回归系数即滑坡灾害影响因子权重。经4组参数综合计算,前3 d降雨的量的权重系数经拉伸分别为0.587, 0.220, 0.189。即灾害当日降雨量权重为0.587,前1 d降雨量权重为0.220,前2 d降雨量权重为0.189。

表2 逻辑回归分析结果及拉伸系数

组别	准确率/%	各影响因子的权重系数				拉伸系数	
1	92.5	0.099	0.046	0.037	0.544	0.253	0.203
2	93.2	0.149	0.046	0.041	0.631	0.195	0.174
3	93.2	0.138	0.049	0.045	0.595	0.211	0.181
4	93.4	0.129	0.05	0.044	0.578	0.224	0.197
平均	93.1	—	—	—	0.587	0.220	0.189

因此,降雨诱发地质灾害的综合雨量公式为:

$$Y = 0.587x_1 + 0.220x_2 + 0.189x_3 \quad (4)$$

式中: Y ——降雨诱发滑坡灾害的综合概率值; x_1 ——滑坡灾害当日降雨概率值; x_2 ——滑坡灾害前1 d降雨概率值; x_3 ——滑坡灾害前2 d降雨概率值。

3 气象预警模型研究

3.1 气象模型原理

降雨诱发地质灾害气象预警模型 T 的原理是显式综合气象模型,将单元地质灾害易发性概率与降雨诱发地质灾害的概率利用一定手段相耦合,获得某一地区地质灾害气象预警概率值^[3],其公式为:

$$T = a \cdot H + b \cdot Y \quad (5)$$

式中: T ——地质灾害气象预警概率; H ——单元地质灾害易发性概率; Y ——降雨诱发地质灾害概率; a ——单元地质灾害易发性权重系数; b ——降雨诱发地质灾害权重系数。

其中单元地质灾害易发性概率值“ H 值”综合反映了单元内地形地貌、地层岩性、地质构造等基本因素对形成地质灾害的作用大小,是区域地质的综合背景值,本研究已根据四川省灾害易发性分区获得灾害易发性概率图;降雨因素的发生概率“ Y 值”是指灾害发生时的综合降雨量对地质灾害的形成所造成的影响大小。 a 和 b 分别为两概率值的权重系数,一般由预报员经长期统计经验所得,四川省原地质灾害气象预警模型的 a, b 两参数分别为0.4, 0.682。

3.2 气象预警模型权重系数计算

权重系数决定着模型两概率值对气象预警模型的影响权重,对整个模型的研究起着至关重要的作用。在实际应用中权重系数 a 和 b 常常是根据统计经验确定,缺乏理论支撑。因此,需要对单元地质灾害危险性权重系数 a 以及降雨诱发地质灾害权重系数 b 进行优化计算。由于逻辑回归模型在分析判断地质灾害诱发影响因子方面广泛的应用性以及确定影响因子系数上发挥的巨大作用,本研究决定使用

Logistic 回归分析进行滑坡灾害气象预警模型权重参数计算。基于 2008—2014 年的滑坡历史灾害点数据,根据现气象模型提取其地质背景值 H 与降雨概率值 Y ,根据 Logistic 回归分析建模,通过检验后获得最终的逻辑回归系数权重值为 2.338、3.590,经归一化处理得单元地质灾害危险性权重系数 a 为 0.394,降雨诱发地质灾害权重系数 b 为 0.606。这与经验所得系数十分相近,证明了逻辑回归计算权重系数的准确性。

3.3 气象模型检验

通过以上研究,四川省降雨诱发地质灾害气象预警模型公式如下:

$$\begin{cases} Y=0.587x_1+0.220x_2+0.189x_3 \\ T=0.397H+0.606Y \end{cases} \quad (6)$$

为确保预警预报模型的合理、准确,本研究选取部分灾害点对模型进行验证。由于 Y 与 H 的数值都在 0~0.8 之间,根据四川省预警系统业务习惯,设定地质灾害发生概率 T 超过 0.32 发布黄色预警信号,超过 0.48 发布橙色预警信号,超过 0.64 发布红色预警信号。

3.3.1 模型准确率计算 由于地质灾害点的降雨量信息是通过提取灾害点最邻近的气象站点所得,因此地质灾害的降雨量数据存在误差,本研究剔除无效灾害点以及当日降雨量小于 5mm(表示几乎没有降雨)的

灾害点后试验数据共筛选出滑坡灾害点 4 229 个,放入到预警灾害模型中进行计算,获得以下预警结果。

如表 3 所示,在 4 229 个灾害点中,本气象预警模型有 3 314 个达到黄色预警级别,其数量占总灾害的 78.36%,有 1 217 个达到橙色预警级别,其数量占总灾害的 28.77%,证明本模型对滑坡灾害有较好的预报准确率;在 76 个灾害规模为大型及特大型的灾害点中,有 65 个(85.52%)达到黄色预警级别,41 个(53.94%)达到橙色预警级别,证明本模型的预报准确率为 78.36%,漏报率约为 21.63%,同时在重大灾害点的预报方面有较好的预报预警效果。

表 3 灾害模型各预警等级准确率

频次	预警等级		
	黄色预警	橙色预警	红色预警
灾害点频次(4 229)	3 314(78.36%)	1 217(28.77%)	283(6.69%)
重大灾害点频次(76)	65(85.52%)	41(53.94%)	4(5.26%)

3.3.2 模型的个例检验 本研究以 2013 年 7 月 10 日绵阳市、德阳市及成都市发生的群发滑坡灾害为个例验证模型的预警效果。7 月 8、9、10 日连续 3 d 龙门山一带均有较大降雨,7 月 9 日的降雨最大值在 389 mm,10 日的雨量最大值在 266 mm。经 Y 模型计算得 3 d 的综合雨量分布状况如图 4 所示,龙门山断裂带附近综合雨量值达到 245 mm。

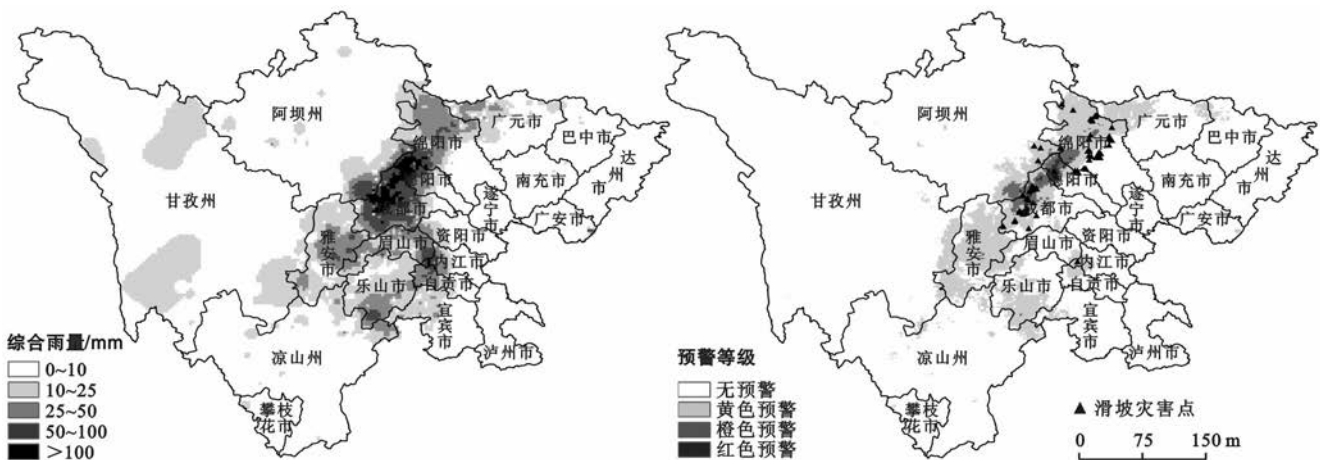


图 4 2013 年 7 月 10 日的综合雨量值与预警结果

将综合雨量叠加背景值后,套入公式(6)计算出 7 月 10 日的降雨诱发滑坡灾害气象预警模型图,并将研究区域的滑坡灾害点投入到 T 模型进行计算。如图 4 所示,黄色预警、橙色预警及红色预警区域范围与降雨量分布趋势相似,同时,预警区域内涵盖了大多数的滑坡灾害点,根据统计,在提取 226 个滑坡灾害点中,达到黄色预警等级的灾害点有 200 个,达

到橙色预警等级的灾害点有 67 个,达到红色预警范围的灾害点有 31 个。因此,本次滑坡个例的单个预警精度达 88.5%,漏报率为 11.5%,模型的整体预报准确性较高,对于群发性的灾害有较好的预报效果。对于未到预警级别的灾害点,分析其原因主要归结于以下几点:①由于历史灾害上报时间不够精确,部分灾害点的降水数据存在误差,导致历史灾害预警模型

结果存在误差;②由于历史灾害点上报地理坐标存在误差,导致所采集的地质灾害背景值及降雨量与实际灾害发生状况均存在差异;③降雨量提取的方法有待考究。因此,在本模型的实际运行中,在准确的实况降水数据和预报降水数据基础上,预警区准确性将有进一步提高。

4 结论

(1) 本研究通过对四川省滑坡灾害与其前期日降雨量之间的关系研究,基于逻辑回归分析得到降雨诱发地质灾害模型的日降雨量权重值,当日降雨量,前1 d降雨量和前2 d降雨量的权重分别为0.587, 0.220, 0.189;同时,本研究对地质灾害气象预警模型的单元地质灾害易发性概率值和单元降雨因素发生概率的两权重参数进行优化计算,通过逻辑回归分析获得两权重参数值分别为0.394, 0.606,这与长期经验值相近,从而论证了权重参数优化的准确性;在气象预警模型构建后对模型进行检验,通过2013年7月10日的群发灾害个例证明模型有良好的预警效果,空报率较低,经计算模型的整体预警准确率可达到78.36%,漏报率约为21.63%,与全国的平均预报准确率相比有了较大提高,证明本模型具有较好的预报效果。

(2) 虽然模型的整体预报水准较高,但仍有部分预警结果不理想,原因有如下几点:①由于上报的滑坡灾害点的坐标由预报员人工定位,其精度和准确度受到一定限制,与实际灾害发生位置有所偏差,因此灾害点的地质背景值与降雨量获取不准确;②由于灾害点的气象降雨获取方式受气象站点分布影响,四川地区有部分区域气象站点分布较少(如阿坝州、甘孜州等地),因此灾害点位置的实际降雨量不能完全准确获取;③滑坡灾害的形成与发生是多种因素共同影响的结果,本研究采用的灾害区划未能呈现部分地质影响,因此与实际地质环境存在一定差异;④本研究在降雨信息因子中仅考虑了灾害前两日的雨量,未考虑对滑坡有明显影响的累积雨量和小时雨量等;⑤本研究所采用的降雨量化方式较为陈旧。综上所述原因,导致模型预报效果不佳。

(3) 在提高模型准确率方面,本研究总结了以下途径:①优化降雨概率化方法,采用更优的拟合公式量化降雨量数值;②考虑对灾害点样本进行筛选,选择能够明显呈现灾害降雨特征的样本数据进行建模,从而优化模型;③适当增加前期雨量的时间范围,如前10, 15 d等进行模型拟合;④构建模型时增加更多降雨信息因素,如时降雨量,降雨历时,前期累积雨

量,降雨强度等;⑤由于四川地区降雨条件复杂,可考虑分区域构建模型,针对不同降雨类型的滑坡灾害,构建不同的降雨诱发灾害模型,如针对当日大降雨型滑坡,当日雨量及小时强降雨量对灾害的影响较大,应增加当日雨量权重或着重考虑小时雨量的影响,对于前期降雨型滑坡可考虑增大前期日雨量的权重影响,对于持续降雨型滑坡可在模型中采用累积雨量信息因子;⑥时刻关注地质环境的动态变化,及时更新地质灾害区划背景图,以保证模型的准确程度;⑦适当调整气象临灾预警的临界预警值,选择合适的等级预警范围,以保证预警效果良好;⑧气象部门应逐步在川西地区增加雨量站点,保证雨量站均匀分布,同时提高降雨量的准确度,以保证模型计算效果;地质监测部门也应增设灾害监测站,保证灾害的基本地理及其他属性信息准确无误。综合以上方式,定能提高预警模型的准确程度。

(4) 本研究的成果适于四川省的地质灾害预警系统,能够为预警工作提供参考,提醒政府及各部门做好地质灾害防范措施,为今后相关决策发挥作用。

[参 考 文 献]

- [1] 邓绍辉. 建国以来四川山地灾害的特点及防治对策[J]. 西南民族大学学报:人文社科版, 2004, 25(4): 297-300.
- [2] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 109-115.
- [3] 梁润娥, 李中社, 苗高建, 等. 区域地质灾害气象预警模型研究现状与展望[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 30-35.
- [4] 刘艳辉, 刘传正, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 34(4): 738-746.
- [5] 毕宝贵, 徐晶, 张国平. 国家气象中心地质灾害气象预报业务进展[C]//中国气象学会. 2006年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 2007: 19-29.
- [6] 陈景武. 蒋家沟泥石流预警报系统的试验研究[M]//吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究, 北京: 科学出版社, 1990: 197-199.
- [7] 文科军, 王礼先, 谢宝元, 等. 暴雨泥石流实时预报的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 59-64.
- [8] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 33-35.
- [9] 王卫东, 陈燕平, 钟晟. 应用 CF 和 Logistic 回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(4): 1127-1132.
- [10] Gorsevski P V, Gessler P E, Foltz R B, et al. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis[J]. Transactions in GIS, 2006, 10(3): 395-415.

甸地土壤温度和土壤含盐量。对8个不同深度土壤温度、土壤盐分的模拟值和观测值对比统计,模型效率都在0.59以上,平均偏差在0.03以下。随着土壤深度增加,土壤温度、盐分的模拟效果变好。

(2) 相较于草甸地温度和盐分的模拟,土壤含水率的模拟结果存在一定的偏差,但对不同深度的土壤含水量模拟结果的总体趋势与中子仪观测情况基本接近,模拟结果仍具有一定的可信度。30 cm以上土壤含水率模拟结果稍差的原因可能是由于参数不确定性,一些参数需要通过室内试验与经验值进行判断。

(3) 利用 SHAW 模型模拟科尔沁草甸地土壤水热盐耦合变化是基本可行的,其输出结果相对较好。但模型中多数公式均为经验性的,需通过更多的观测试验改进和完善相关参数,以提高模型适用性。

因此,SHAW 模型可用于科尔沁草甸地水热盐动态变化规律研究。模拟结果可为该地区冬春作物的播种和预防冻害等提供参考依据,可以被借鉴定量模拟预测农田在自然条件下的垂向一维冻土—非冻土系统内的水热盐迁移状况。

[参 考 文 献]

[1] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展,2005,13(3):298-302.

[2] 王生廷,盛煜,吴吉春,等. 祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J]. 冰川冻土,2015,37(1):27-37.

[3] 赵显波,刘铁军,许士国,等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. 冰川冻土,2015,37(1):233-240.

[4] 焦永亮,李韧,赵林,等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. 冰川冻土,2014,36(2):237-247.

[5] 张泉,刘咏梅,杨勤科,等. 祁连山退化高寒草甸土壤水分空间变异特征分析[J]. 冰川冻土,2014,36(1):88-94.

[6] 吴谋松,王康,谭霄,等. 土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J]. 水科学进展,2013,24(4):543-550.

[7] 胡列群,武鹏飞,梁凤超,等. 新疆冬春季积雪及温度对冻土深度的影响分析[J]. 冰川冻土,2014,36(1):48-54.

[8] 陈晓飞,田静,张雪萍,等. 积雪融雪过程中水、热、溶质耦合运移规律的研究进展[J]. 冰川冻土,2006,28(1):287-292.

[9] 赵林,李韧,丁永建. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究[J]. 冰川冻土,2008,30(6):930-937.

[10] 陈晓磊,杨梅学,万国宁,等. CLM3 和 SHAW 模式在青藏高原中部 NMQ 站的模拟研究[J]. 冰川冻土,2013,35(2):291-300.

[11] 郭东林,杨梅学. SHAW 模式对青藏高原中部季节冻土区土壤温、湿度的模拟[J]. 高原气象,2010,29(6):1369-1377.

[12] Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, et al. Simulation of energy and water balance in soil-vegetation-atmosphere transfer system in the mountain area of Heihe river basin at Hexi corridor of northwest China [J]. Science in China(D),2005,48(4):538-548.

[13] 罗斯琼,张宇,吕世华. 黄土高原土壤冻融过程的观测和模拟[J]. 冰川冻土,2008,30(2):234-243.

[14] 常龙艳,戴长雷,商允虎,等. 冻融和非冻融条件下包气带土壤墒情垂向变化的试验与分析[J]. 水科学进展,2014,36(4):1031-1041.

[15] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system (D): Theory and development [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(2):565-0571.

[16] 成向荣,黄明斌,邵明安. 基于 SHAW 模型的黄土高原半干旱区农田土壤水分动态模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(11):1-7.

[17] 郑冬梅,许林书,罗金明,等. 松嫩平原盐沼湿地冻融期水盐动态研究:吉林省长岭县十三泡地区湖滩地为例[J]. 湿地科学,2005,3(1):48-53.

(上接第 321 页)

[11] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2001:1-12.

[12] 宋光齐,李云贵,钟沛林. 地质灾害气象预报预警方法探讨:以四川省地震灾害气象预报预警为例[J]. 水文地质工程地质,2004,31(2):33-36.

[13] 麻土华,郑爱平,李长江. 降雨型滑坡的机理及其启示[J]. 科技通报,2014,30(1):39-43.

[14] 徐晶,张国平,张芳华,等. 基于 Logistic 回归的区域地

质灾害综合气象预警模型[J]. 气象,2007,33(12):3-8.

[15] 饶传新. 基于 WebGIS 的宜宾市地质灾害气象监测预警服务系统的研发[D]. 成都:电子科技大学,2014:16-17.

[16] 程晓露,张华莉. 陕西省地质灾害气象预报预警系统的应用与现状[J]. 陕西地质,2005,23(2):84-89.

[17] 王卫东,钟晟. 基于 GIS 的 Logistic 回归模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 工程勘察,2009,37(11):5-10.