

文章编号: 2096-1618(2019)06-0625-07

川东北地区滑坡易发性区划及气象预警模型研究

郭小莹, 肖天贵

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对川东北地区频繁发生的滑坡灾害,利用坡高、归一化植被指数、坡度、剖面曲率、距水系、道路距离、当日降水和前期有效降水数据,采用逻辑回归计算方法对川东北地区的滑坡灾害进行易发性区划,建立川东北地区滑坡灾害气象预警模型并进行验证,结果表明川东北地区整体上都处于滑坡灾害易发区,滑坡灾害易发程度南高北低;选取2次滑坡灾害过程验证滑坡预警模型,检验结果模型模拟结果较好,实现了川东北地区基于地质条件的降雨诱发区域滑坡灾害预警模型的研究。

关键词:大气科学;气象灾害与防灾减灾;川东北地区;滑坡;气象预警模型;逻辑回归

中图分类号:P429

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.06.011

0 引言

川东北地区是四川东北部的广安市、巴中市、南充市、达州市和广元市的简称,是四川省的东北门户,与陕西省和重庆市相连,是四川通往其他省的重要通道,也是新丝绸之路经济带覆盖区。但是川东北地区的灾害隐患点在四川省灾害隐患点中的比重占32.78%,川东北地区的滑坡灾害占各类自然灾害总数的82.36%,经常发生的滑坡灾害会影响受灾地的经济和社会发展。在这种情况下,对川东北地区的滑坡灾害进行易发性研究,对容易发生滑坡灾害的地方进行严密观测,做到及时预防,可以避免财产损失和人员伤亡。

目前对滑坡灾害易发性的区划主要有定性和定量两种方法。定性的方法是指专家在自己了解的基础上,对导致灾害发生的各个致灾因子的影响程度进行判断并赋予权重,最后各因子根据权重进行叠加,获得分区结果。许冲等^[1]通过遥感影像数据确定汶川地震区滑坡典型发生区,并提取诱发滑坡灾害发生的地质因子通过层次分析法确定权重并定义滑坡易发性指数进行分区。定量的方法指将导致灾害发生的致灾因子和历史灾害数据使用合适的数学模型进行关联分析并叠加,得到易发性分区。刘明学等^[2]选取岩土类型、坡度、高程、植被等8种因子作为崩塌流发生的影响因子,对各因子进行敏感性分析,在此基础上采用逻辑回归模型和确定性系数进行分区,对分区进行检验。杜谦等^[3]采用逻辑回归和信息量模型进行定量计算将研究区的地质灾害按照发生的可能性分为三个区,验证了模型的ROC曲线,分区结果较为理想。

在滑坡灾害预警方面,早期的预警模型仅把降水当作单一的触发机制,以降水阈值作为预警的唯一标准进行预报,后来采用专家打分的方法进行改进,虽然预警精度有所提高,但是该方法仍然存在主观性较强、精度较低的不足^[4-6]。近年来不断有学者对灾害发生的判断依据进行修正、对灾害预报模型的参数进行不断完善,将地质环境变化与降雨参数耦合叠加建立预警模型,比较适用于地质环境比较复杂的区域^[7]。四川省早期的滑坡灾害预警模型只考虑了降雨对滑坡的影响,根据降水量的多少判断是否发生滑坡灾害,后来用专家打分的方法对滑坡预警模型进行改进,但是预报的主观性依旧很强,精度较低。虽然四川省在滑坡灾害区划和预警方面有了较多的研究,但是由于受灾数据和地质数据不完整,缺乏客观的、精细的基于地质-气象耦合的滑坡灾害预警模型。为更准确客观地对川东北地区的滑坡灾害进行评估和预警,收集了川东北地区基础地质数据、历年滑坡历史数据、灾害隐患点数据、降水数据等资料,建立川东北地区的滑坡灾害预报预警模型,从而减少滑坡灾害对社会的经济损失。

1 资料和方法

1.1 方法

选择 logistic 回归模型作为降水诱发滑坡灾害易发性评价的方法。logistic 回归模型因变量 Y 只取2个值(0和1)^[8],经过简单的推理假设可以得到 logistic 分布函数:

$$P(y_i = 1 | x_i) = P[\varepsilon_i < (\alpha + \beta x_i)] = \frac{1}{1 + e^{-\varepsilon_i}}$$

收稿日期:2019-03-06

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAC03B00);国家电网公司科技资助项目(SGLNDK00KJJS1700200)

即 $P(y_i = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x_i)}}$

式中 α, β 为系数, ε_i 为误差项, x_i 为自变量。

定义某一事件发生的条件概率为

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x_i)}} = \frac{e^{\alpha + \beta x_i}}{1 + e^{\alpha + \beta x_i}}$$

对事件的发生比 (Odds) 取自然对数, 得到一个连续函数:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n$$

即 $P = \frac{e^{\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n}}$

式中 α 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ 为回归系数。对某一

要素进行回归分析可以得到回归系数, 可以通过以上步骤来计算出现成功事件的概率 P 值, 也就是事件发生概率的大小。将公式应用到滑坡灾害易发性区划中, P 值就是参与评价点是否会发生滑坡灾害的可能性。

1.2 数据来源

选用国内外研究中普遍适用的地形因子和地质因子以及滑坡灾害发生时的当日降水和前期累积降水量作为评价指标, 结合川东北地区的地理环境, 选用日降水量、坡高、归一化植被指数、坡度、剖面曲率、距离水系距离、距离道路距离等因子建立滑坡灾害预警模型, 基本数据类型及来源见表 1。

表 1 数据类型以及来源

数据类型	名称	年份	来源	分辨率
文本数据	地质灾害隐患点	2016	四川省国土资源厅	11100 个
	川东北地区降水数据	2011–2016	中国气象数据共享网	天
矢量数据	川东北地区公路分布图	2016	OpenStreetMap 地图平台	
栅格数据	川东北地区海拔高程数据 (DEM)	2009	地理空间数据云网站	30 m
	川东北地区归一化植被指数 (NDVI)	2011–2016	地理空间数据云网站	250 m

2 研究区概况

川东北地区位于四川省的东北部, 总面积 64004 km²。与甘肃省、陕西省和重庆市相连, 是四川通往西北和东部的必经之路。川东北地区地处 30°N 附近, 属于亚热带季风性湿润气候区, 该气候区内降水量的季节分布差异性较大, 多年年平均降雨量为 1035.49 mm, 其中 6–9 月的多年平均降水量为 667.8 mm, 占全年降水量的 64.5%。1 月降水量最小, 只有 12.4 mm, 占全年降水量的 1.2%。对发生在川东北地区的历史灾害进行统计分析, 发生的滑坡灾害占地质灾害总数的 88.33%, 对滑坡灾害发生时间进行统计后发现, 有 85.71% 的滑坡灾害发生在 6–9 月, 与年降水量大值相对应, 因此川东北地区的滑坡灾害绝大多数是由于降水量的增大引发的。

3 基于 logistic 回归模型的内部因子诱发滑坡灾害易发性区划

通过对川东北地区大的滑坡灾害的致灾因子进行细致分析, 可以认为影响滑坡灾害发生的因素可以分为两种: 一种是内部因素, 包括有海拔高度、山体坡度、河流湖泊等水系分布情况、植被覆盖程度等, 一般不会随

着时间的变化产生太大的差异; 另一种是诱发因素, 包括有 人类工程活动 (道路修建、修建住房) 和降水。选用 2015 年道路分布图作为人类工程活动跟内部因素一起考虑为静态因子^[9]。使用除了降水以外的 6 个因子作为易发性区划的评价因子, 降水在后面另作考虑。

3.1 滑坡易发性评价模型的构建

3.1.1 滑坡易发性评价因子提取

斜坡不同高度的稳定程度不同; 不同高度的温度、湿度及气候等各不相同导致植被覆盖率不同, 斜坡坡高可以反映出滑坡灾害出现的危险程度, 一般来说斜坡的坡高越高, 稳定性越差, 越容易发生滑坡; 山体落差越大, 岩土体的势能就越大, 滑坡发生后产生的破坏越大, 通过 ArcGIS 软件对川东北地区的地形高程图进行重分类, 将川东北地区的高度每隔 500 m 划分为一个等级, 划分为 4 类 (图 1a), 可以看出川东北地区为北高南低的地形, 高程变化范围在 82 ~ 3810 m, 沟谷切割较深, 容易发生地质灾害。在植被覆盖率高的地区地质灾害相对较少, 用归一化植被指数表示川东北地区的植被覆盖率 (图 1b), 其中负值表示地面覆盖的是云和雪等, 0 值表示地面裸露, 没有植被覆盖, 正值表示地面有植被覆盖, 值越大表明覆盖率越高。另外坡度对地质灾害的形成也有着重要的影响, 川东北地区的坡度图采用 ArcGIS 的 slope 直接提取获得

(图 1c),可以看出川东北地区的斜坡坡度主要在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$,利于滑坡灾害的形成,其中 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 斜坡坡度较缓,不利于地表径流,有利于降水入渗,常常诱发大量的地质灾害。剖面曲率是斜坡表面的二阶导数^[8],即沿着斜坡最大斜率的坡度,正值表示斜坡表面向外凸起,负值表示斜坡表面向内凹入,值为 0 表示斜坡表面是平的。从川东北地区的数字高程模型直接提取剖面曲率(图 1d),将 <-0.5 、 $-0.5 \sim 0.5$ 、 >0.5 分别定义为凹形坡、平直型坡和凸形坡,可以看出川东北地区的斜坡主要属于平直型坡。河流的作用与地质灾害有着

重要的联系,河流的下切和侧蚀作用容易使得岩土体的稳定度下降,有利于地质灾害的发生,根据前人的研究利用 ArcGIS 的邻域分析工具将距河流距离每隔 100 m 划分为一个等级,超过 500 m 不予考虑(图 1e)。另外人类的城市建设、农田开垦、开采矿产等生产生活活动不可避免地对山体进行填挖改造,不合理的生产活动会打破斜坡岩土体的稳定度,诱发地质灾害;主要考虑道路建设对滑坡灾害的影响,将距离道路的距离分为 $0 \sim 25$ m、 $25 \sim 50$ m、 $50 \sim 75$ m、 $75 \sim 100$ m、 $100 \sim 125$ m 这 5 个等级(图 1f)。

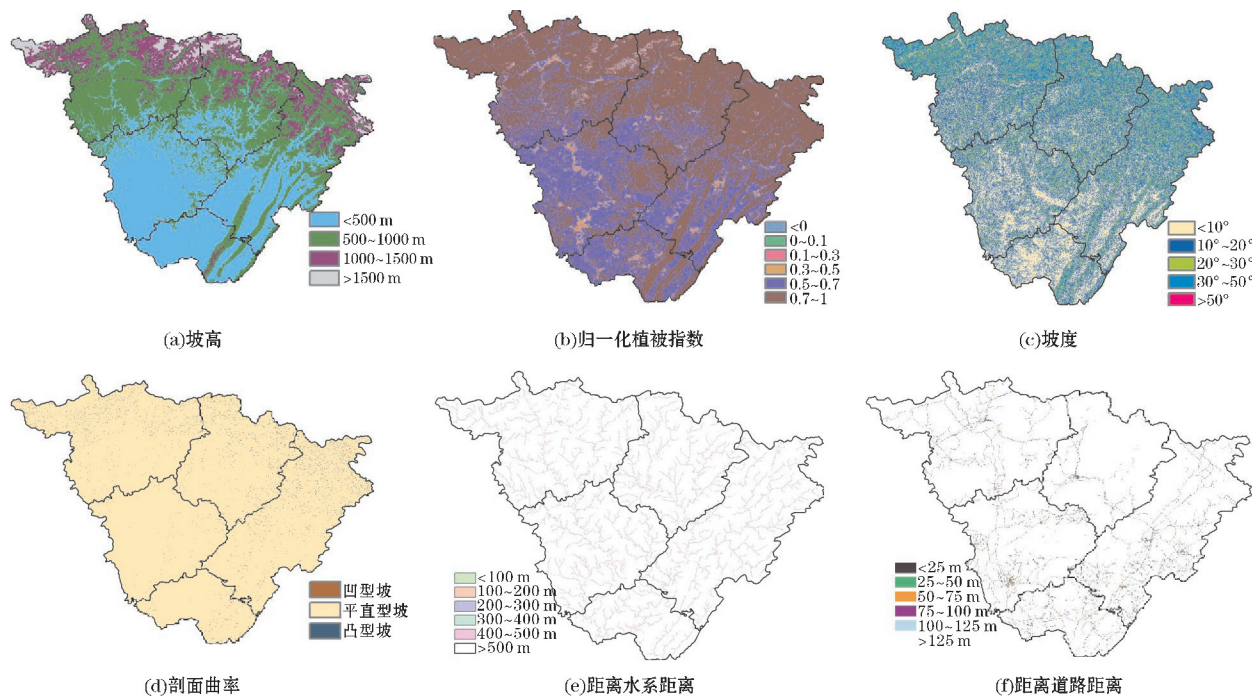


图 1 川东北地区滑坡灾害致灾因子分级

3.1.2 评价因子的量化处理

将川东北地区的基础数据的栅格大小定为 30×30 m。通过 arcgis 进行各评价因子重采样对各个因子进行分级得到各因子的二级因子(图 1),因为每个因子的单位不同,所以有必要对每个二级因子进行量化处理。量化处理的方法是提取各二级因子中曾发生滑坡的灾害点的个数作为二级因子中灾害点占的面积与二级因子的总面积进行相比,得到二级因子的指标值 Y_{ij} ,其中 $i=1,2,\dots,n$ 是一级因子的序号; $j=1,2,\dots,m$ 是二级因子的序号^[10]。将 Y_{ij} 归一化处理获得川东北地区各二级因子的指标值 I_{ij} (表 2)。

3.1.3 内部因子诱发滑坡评价易发性评价模型

根据张锡涛等^[11]、常鸣等^[12]、李云君等^[7]的研究,使用 ArcGIS 软件的空间分析和矢量数据工具集等功能随机生成与有效滑坡灾害点距离 3 km 的 2147 个未发生地质灾害点和 3855 个有效滑坡灾害点一起作

为统计样本。在 SPSS 软件中进行 logistic 回归分析,对前面选取的 6 个评价因子采用逐步回归的方法进入模型,得到相应的回归系数和显著性(sig 值)见表 3。根据逻辑回归分析结果,剖面曲率和坡度的 $\text{sig}>0.05$,没有进入最终的回归模型,对剩余因子用 SPSS 进行共线性诊断(表 4),一般来说 $\text{TOLERANCE}<0.2$,则评价因子多元共线性存在,且 $\text{TOLERANCE}<0.1$ 时,评价因子存在严重的多元共线性。从 6 个评价指标进行共线性诊断来看,最终确定坡高、距离水系距离、距离道路距离和归一化植被指数作为川东北地区滑坡易发性区划评价指标,通过分析可以看出坡高的系数最大,也就是说坡高对滑坡灾害的形成影响最大,通过分析滑坡灾害主要发生在海拔低于 1000 m 的斜坡中,而在海拔大于 1000 m 的斜坡中不容易发生,因为人类工程活动主要集中在 500 ~ 1000 m 的斜坡中,在日常生产生活中,大量开垦的农田或者开采的矿产使得地表稳定性下降,常产生

滑坡灾害。归一化植被指数系数为负数,表明植被稀疏反而不容易发生滑坡,这与以往的认知不一样,主要是因为川东北地区海拔差距很大,人类在海拔低的地区进行生产生活,植物也适宜在海拔低的地区生存,导致

地表水不易排泄,因此产生滑坡灾害。距道路距离系数为负数,表明道路修建对地质灾害的形成影响较大,距离道路越近产生地质灾害的概率越大。

表 2 影响因子分级情况与指标值

评价指标体系			二级因子的		Y_{ij}	I_{ij}
一级因子	序号	二级因子	灾害点个数	二级因子面积 (km^2)		
坡高	1	<500 m	2323	26657.8502	0.08714131	0.54797526
	2	500 ~ 1000 m	1338	26124.0708	0.05121713	0.32207137
	3	1000 ~ 1500 m	182	8828.5065	0.02061504	0.12963462
	4	1500 ~ 2000 m	12	236740.051	5.0689E-05	0.00031875
	5	>2000 m	0	403.580306	0	0
距离水系	1	<100 m	135	916.314566	0.14732932	0.17239758
	2	100 ~ 200 m	157	902.017771	0.17405422	0.20366975
	3	200 ~ 300 m	119	887.526784	0.13408046	0.15689441
	4	300 ~ 400 m	172	872.506684	0.19713316	0.2306756
	5	400 ~ 500 m	128	857.507625	0.14926981	0.17466825
	6	>500 m	3144	59631.9066	0.05272345	0.06169441
公路	1	<25 m	100	297.366226	0.33628567	0.24543362
	2	25 ~ 50 m	59	268.209481	0.21997731	0.16054751
	3	50 ~ 75 m	75	258.137504	0.29054283	0.21204881
	4	75 ~ 100 m	55	249.772955	0.22019998	0.16071002
	5	100 ~ 125 m	60	242.62742	0.24729274	0.18048331
	6	>125 m	3506	62751.6664	0.05587103	0.04077672
归一化植被指数	1	<0	1	29.972425	0.033364	0.08231887
	2	0 ~ 0.1	3	123.220041	0.02434669	0.06007049
	3	0.1 ~ 0.3	56	546.164231	0.10253326	0.25297991
	4	0.3 ~ 0.5	228	1850.87798	0.12318478	0.30393333
	5	0.5 ~ 0.7	1814	24233.0805	0.07485635	0.18469278
	6	0.7 ~ 1.0	1753	37284.4648	0.0470169	0.11600462
坡度	1	<10°	1642	23937.1586	0.06859628	0.28165077
	2	10 ~ 20°	1461	22587.824	0.06468087	0.2655744
	3	20 ~ 30°	582	11960.6569	0.04865953	0.19979211
	4	30 ~ 50°	214	5447.80582	0.03928187	0.16128818
	5	>50°	3	134.334705	0.02233228	0.09169453
剖面曲率	1	凹形坡	209	5118.03415	0.04083599	0.2744864
	2	平直型坡	3414	53670.7081	0.06361012	0.42756674
	3	凸形坡	234	5279.03773	0.04432626	0.29794686

表 3 logistic 回归模型各评价因子的系数

评价因子	B 逻辑回归系数	S. E. 标准误差	Wald 卡方值	Df 自由度	Sig 显著性	Exp(B)
距水系距离	0.127	0.035	13.511	1	0.000	1.136
坡高	-0.947	0.047	410.832	1	0.000	0.388
归一化植被指数	-0.196	0.051	14.718	1	0.000	0.833
距公路距离	-0.617	0.061	103.296	1	0.000	0.539
坡度	0.038	0.034	1.266	1	0.260	1.039
剖面曲率	0.051	0.078	0.436	1	0.509	1.053
常数	5.948	0.408	212.307	1	0.000	383.007

表 4 通过 logistic 回归模型各评价因子的共线性诊断表

评价因子	TOLERANCE(容许度)	VIF(方差膨胀因子)
距水系距离	0.412	2.425
坡高	0.831	1.203
归一化植被指数	0.844	1.185
距公路距离	0.408	2.448

根据 logistic 回归模型中的各评价因子的系数值,计算滑坡灾害发生概率 P_a ,可以得到内部因子诱发川东北地区的滑坡灾害易发性评价模型为

$$\ln\left(\frac{P_a}{1+P_a}\right)=5.948-0.947\times\text{"坡高"}+0.127\times\text{"距水系距离"}-0.196\times\text{"归一化植被指数"}-0.167\times\text{"距公路距离"}.$$

3.2 内部因子诱发川东北地区滑坡灾害易发性区划

根据表 1 对各个评价指标进行量化处理后的结果代入川东北地区的 logistic 回归模型预测公式,通过 ArcGIS 软件对坡高、归一化植被指数、距离公路距离及距离水系距离 4 项进行栅格计算并进行平滑处理,对计算结果采用自然间断法分为 4 类,包括不易发区、低易发区、中易发区和高易发区,得到内部因子诱发川东北地区滑坡灾害易发性分区图(图 2),从图中可以看出,川东北地区整体上都处于滑坡灾害易发区,滑坡灾害易发程度南高北低,高易发区包括南充、广安大部、巴中南部和达州南部,该地区以低山丘陵为主;中易发区位于广元南部、巴中中部和达州中北部,该地区主要为深丘中丘地貌;低易发区位于北部高山区。

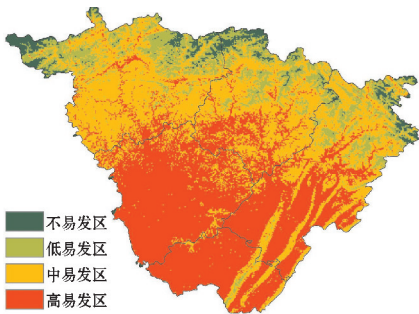


图 2 内部因子诱发川东北地区滑坡易发性分布图

与侧重于专家了解掌握研究区情况来进行分区的专家打分法、层次分析法相比,Logistic 回归模型使滑坡地质灾害易发性区划的结果更为客观准确,在易发区划的基础上进行防范有更加明确的指向性,对高易发区要进行重点的防范,该区域与滑坡灾害发生的实际灾情分布一致;对中易发区要安排专人在滑坡易发生的季节进行排查,有针对性地进行预防,从而达到防灾的目的。

4 由降水引发滑坡易发性区划研究

4.1 降水单因素引发滑坡易发性的评价模型

对川东北地区的滑坡灾害发生时的降水进行统计,发现有一半的当日降水量大于 50 mm,前 7 天的降水量大小不一,这部分可能是由于降水量突增使地表压力增大导致滑坡,还有一半的当日降水量小于 50 mm,但是前 7 天的总降水量相对较大。这是由于长期的降水导致土体中的水分已经饱和或者接近于饱和,因此,少量降水量也可以导致滑坡发生。选取 2011–2016 年 150 条历史灾害点的当日降水量、前期有效降水与发生滑坡灾害之间逻辑回归关系对川东北地区降水诱发的滑坡灾害的易发性进行研究。关于前期有效降水国内已经有了很多的应用^[13–14],提出了计算前期有效降水量的公式: $r_i=kr_1+k^2r_2+\cdots+k^nr_n$ 。式中 r_i 表示第 i 天的前期有效降雨量; k 为有效降雨系数($k\leq 1$),表示降水对地质环境稳定度的影响,是由当地的整体地质环境的性质决定的,一般取 0.84^[15]; r_n 表示前第 n 天的降雨量(mm)。对当日降水量以及前 n 日(n 取 1,2,⋯, n)的有效降雨量与滑坡灾害发生进行逻辑回归计算,得到它们之间的相关系数。选用当日和前 5 日降水量进行计算,逐一增加自变量进行计算,只有当日降水量与前 1 日有效降水量时的模型预测总占比分达到最高 84.4%,并且通过了显著性检验,因此由于降水单一因素引发川东北地区滑坡灾害的预测概率公式为

$$P_b=\frac{e^{-1.316+0.713\times R+0.069\times R_1}}{1+e^{-1.316+0.713\times R+0.069\times R_1}}$$

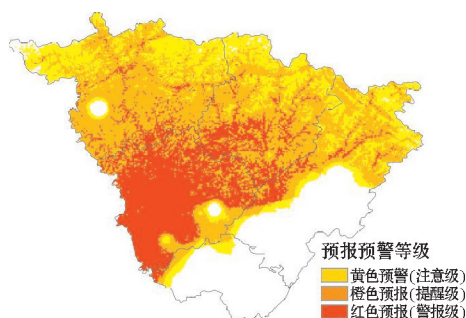
其中, P_b 为降雨引发川东北地区滑坡灾害发生的概率, R 为川东北地区滑坡灾害发生时当日降水量, R_1 为川东北地区滑坡灾害发生前一日有效降水量。

4.2 区域滑坡灾害预报模型

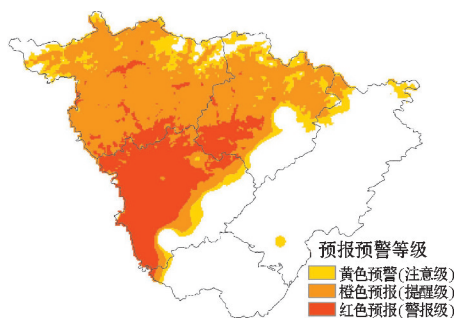
将基于川东北地区内部因素(主要是地质条件)引发的滑坡灾害的易发性分区 P_a ,与降水单因素引起的滑坡灾害发生的概率 P_b 进行叠加,得到滑坡灾害发生时的实时预报概率值 P_c ,即 $P_c=P_a\times P_b$ 。以川东北地区的降水数据和历史发生灾害的资料为基础,按照自然间断法进行分级,0.25、0.5、0.75、0.85、0.95 分别为蓝色、绿色、黄色、橙色、红色预警的临界值。

选用 2013 年 7 月 20 日与 2015 年 6 月 29 日 2 个例子对川东北地区的滑坡灾害气象预警模型进行验证,

2013年7月20日,南充市营山县发生了一起山体滑坡,滑坡体长200 m,厚150 m,滑坡体总方量105万 m^3 ;2015年6月29日巴中市南江县全县普降大到暴雨,南江县全县48个乡镇受灾,部分地区出现滑坡现象。以川东北地区气象观测站的2013年7月20日与2015年6月29日当日日降水量和前一日有效降水量为基础代入模型计算,得到预测结果(图3)。



(a) 2013年7月20日



(b) 2015年6月29日

图3 川东北地区2013年7月20日与
2015年6月29日滑坡灾害预警图

从图3(a)可以看出,2013年7月20日川东北地区除达州南部和广安市外均处于预警区域内,南充市大部 and 巴中市的南部处于红色预警区,在历史滑坡灾害中当日南充市营山县和达州市渠县发生滑坡灾害,两处滑坡灾害均在预警范围内,但是渠县灾害等级为黄色预警,等级预报不准确。图3(b)可以看出2015年6月29日南充市的东北部、广元市和巴中市的大部分地区都处于预警范围,尤其南充市的东北部是本次预警的重点地区。在历史滑坡灾害中,2015年6月29日在广元市剑阁县盐店镇和巴中市通江县发生了滑坡,红色预警区域代表的是灾害容易发生,但并不是该区域内所有地区都会发生滑坡,两处发生滑坡灾害的地点灾害均在预报范围内,因此,判定该预测模型实用性比较强,可以达到预期目的来提前预防以减少损失。

5 结论

在分析川东北地区滑坡灾害发生和分布的基础

上,结合该区域内的地质环境,提取影响滑坡发生的评价因子,采用逻辑回归模型,提出了由于降雨诱发并结合川东北地区地质条件的区域滑坡灾害的预报模型,主要有如下研究成果:

(1)选取影响该地区滑坡发生的内部因子,包括有坡高、归一化植被指数、坡度、剖面曲率、距水系和道路距离等6个指标,建立了滑坡灾害易发性评价指标采用逻辑回归模型建立了川东北地区内部因子诱发滑坡灾害的易发性评价模型(P_a),绘制了内部因子诱发研究区滑坡灾害易发性区划图。

(2)采用川东北地区滑坡灾害发生时当日的降水量和前期有效降水量作为评价指标,建立了降雨单因素诱发滑坡灾害的逻辑回归模型(P_b)。

(3)建立了川东北地区滑坡灾害的气象预警模型,将研究区的内部因子诱发滑坡灾害易发性概率值(P_a)和由降雨单因素诱发滑坡灾害易发性的概率值(P_b)进行乘叠,得到滑坡灾害发生的实时预报概率值(P_c),并用一次灾害过程进行验证,具有一定的实用性,但是在未来的研究中应努力提高预报等级的精确度,确保滑坡灾害预报的准确度。

参考文献:

- [1] 许冲,戴福初,姚鑫,等. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3978-3985.
- [2] 刘明学,陈祥,杨珊妮. 基于逻辑回归模型和确定性系数的崩滑流危险性区划[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1250-1256.
- [3] 杜谦,范文,李凯,等. 二元 Logistic 回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J]. 灾害学,2017,32(2):220-226.
- [4] 刘艳辉,方志伟,温铭生,等. 川东北地区强降雨诱发崩滑流灾害分析[J]. 水文地质工程地质,2014,41(2):111-115.
- [5] 侯圣山,李昂,周平根. 四川雅安市雨城区地质灾害预警系统研究[J]. 地学前缘,2007,14(6):160-165.
- [6] 李媛. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究[D]. 北京:中国地质大学,2005.
- [7] 李云君,刘志红,吕远洋,等. 四川省滑坡灾害气象预警模型建立与验证[J]. 地球信息科学学报,2017,19(7):941-949.
- [8] 王峰. 四川省南江县地质灾害易发性区划研究

- [D]. 成都:成都理工大学,2015.
- [9] 阮沈勇,黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001(1):89-92.
- [10] 黄健敏,赵国红,廖芸婧,等. 基于 Logistic 回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立——以安徽歙县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):98-105.
- [11] 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[J]. 工程地质学报,2013,21(4):598-606.
- [12] 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[J]. 工程地质学报,2012,20(6):971-978.
- [13] 张国平. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象,2014,40(7):886-890.
- [14] 倪化勇,巴仁基,刘宇杰. 四川省石棉县地质灾害发生的雨量条件与气象预警(报)[J]. 水土保持通报,2010,30(6):112-118.
- [15] 杨军,杨仲国,陈春林,等. 逻辑回归模型在降雨型滑坡降雨临界值中的分析与应用[J]. 工程勘察,2014,42(10):27-31.

Study on Landslide Susceptibility Zoning and Meteorological Early Warning Model in Northeastern Sichuan

GUO Xiaoying, XIAO Tianguai

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: For the frequent landslide disasters in northeastern Sichuan, based on slope height, normalized vegetation index, slope, section curvature, distance from water system, road distance, current day precipitation and previous effective precipitation data, using the logistic regression calculation method to carry out susceptibility zoning of landslide disasters in northeastern Sichuan, and establish a weather warning model for landslide disasters in northeastern Sichuan and verify it. The results show that the northeastern Sichuan region is generally in the landslide disaster-prone area, and the landslide disaster is prone to high in the south and low in the north. The landslide warning model was verified by two landslide disasters, and the simulation results of the test results were good. The research on the landslide hazard warning model based on geological conditions in the northeastern Sichuan Basin was realized.

Keywords: atmospheric science; meteorological disasters and disaster prevention and mitigation; Northeastern Sichuan; landslide; meteorological warning model; logistic regression