

doi:10.3799/dqkx.2017.112

降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型： 以云南省红河州监测示范区为例

李芳^{1,2}, 梅红波^{1*}, 王伟森¹, 李正杰¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 云南省国土资源厅信息中心, 云南昆明 650224

摘要: 地质灾害气象风险预警模型研究一直是相关部门以及业界学者的研究热点, 其预警可靠性问题也一直是研究的难点与技术核心, 红河州是云南省地质灾害最为严重的地区之一, 然而对于在红河州区域内的地质灾害气象预警却研究甚少. 在云南省红河州示范区首次采用 100 m×100 m 的预警单元, 综合考虑地质灾害的降雨诱发因子、地质环境因素, 并基于信息量法构建地质灾害气象风险预警模型. 该预警模型通过历史灾害事件回代验证, 预警准确率可达 81.8%. 结果表明将气象因素与地质环境因素综合考虑纳入模型是可行的, 是提高地质灾害气象预警水平的有效途径.

关键词: 降雨; 地质灾害; 气象风险预警; 红河州; 信息量法.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2017)09-1637-10

收稿日期: 2016-12-06

Rainfall-Induced Meteorological Early Warning of Geo-Hazards Model: Application to the Monitoring Demonstration Area in Honghe Prefecture, Yunnan Province

Li Fang^{1,2}, Mei Hongbo^{1*}, Wang Weisen¹, Li Zhengjie¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. The Information Center of Department of Land Resources of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract: The researching on geo-hazards risk indicator model has been the hot spot of related departments and scholars, indicating reliability problems have always been a research difficult point and technology core. Honghe prefecture is one of the most serious areas of geo-hazards in Yunnan Province, but little research about geo-hazards risk indicator has been done in this region. Based on the information value method, a geo-hazards indicator model about Honghe prefecture was established considering the rainfall-induced factors, hazard-formative environment of this region which is the first time using 100 m×100 m warning unit. Through the verification of historical geological hazard happening, the accuracy rate of warning can highly reach 81.8%. The result indicated that it's workable to integrate meteorological factors and geological environment factors into the indicator model which can be an effective way to improve the level of geo-hazard warning.

Key words: rainfall; geo-hazards; meteorological early warning; Honghe prefecture; information value method.

0 引言

红河州位于云南省最南部, 该区水系发育密集, 山高坡陡, 地形条件较为复杂, 滑坡、泥石流等地质灾害发育, 是云南省地质灾害最为严重的地区之一.

据云南省地质灾害灾情、避让月报表资料统计, 2014—2016年期间, 红河州共计发生 50 次滑坡灾害, 7 次崩塌灾害, 3 次地面塌陷以及 6 次泥石流灾害, 其中受灾人口达 1 680 人, 造成直接经济损失高达 3 228.77 万元, 频繁的地质灾害极大地威胁着当

基金项目: 云南省级地质灾害防治项目(No.2016025007).

作者简介: 李芳(1978—), 女, 博士研究生, 从事国土资源信息化的研究. ORCID: 0000-0002-3525-0769. E-mail: 41945806@qq.com

* 通讯作者: 梅红波, ORCID: 0000-0001-6377-3877. E-mail: hbmei@cug.edu.cn

引用格式: 李芳, 梅红波, 王伟森, 等, 2017. 降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型: 以云南省红河州监测示范区为例. 地球科学, 42(9): 1637-1646.

地居民的生命和财产安全,成为限制当地经济发展的主要因素之一。为进一步深化全省地质灾害监测预警工作,由云南省国土厅组织,将红河州金平、河口、屏边三县作为滑坡监测预警示范区建设,对地质灾害隐患点布设专业监测仪器进行实时、自动化监测,因此,在该地区进行滑坡等地质灾害气象预警模型研究得到高度关注。

滑坡、泥石流等灾害体是一个复杂的开放系统及耗散体系,具有高度的非线性和复杂性。许多学者对地质灾害预警预报的理论与方法进行了探讨,比较有代表性的是将地质灾害风险评估分为地质灾害易发程度评价、风险性评价 2 个层次:地质灾害易发程度评价主要是对地形地貌、地质构造、工程岩土性质、斜坡结构和斜坡水文地质条件等静态的基础地质条件进行评价(吴树仁等,2009;马云等,2014),从而评估出在静态条件下区域地质灾害发生的可能性大小;然而地质灾害的发生除与特殊的地形和地质条件有关外,暴雨以及连阴雨也是诱发地质灾害的重要因素(苟敏,2009;陈曦炜等,2016),降雨入渗,会引起岩土体软化、岩土体力学强度降低、孔隙水压力增加等,加之暴雨冲刷的外力条件,从而诱发地质灾害,Inagaki and Sadohara(2006)曾采用多元回归的方法研究了降雨对滑坡灾害发生的影响程度,吴益平等(2014)也对地质灾害历史事件与对应的降雨参数进行相关性分析,喻孟良等(2016)采用变系数回归模型,定量识别出了降雨等影响因素对滑坡位移的贡献,上述结果都表明前期有效降雨与地质灾害具有显著相关性。

地质灾害气象风险预警模型研究一直是相关部门以及业界学者的研究热点,其预警可靠性问题也一直是研究的难点与技术核心。褚洪斌等(2003)最早将层次分析法应用于地质灾害危险性分区评价中,彭贵芬等(2006)针对突发性地质灾害采用 PP-ES 模型建立了云南省气象地质灾害预报模式。刘兴权等(2007)基于主成分分析法并采用气象降雨特征与地质环境进行耦合,从而实现地质灾害的预警预测。李华等(2010)建立了河南省主要地域汛期地质灾害预警的 BP 神经网络模型,冯杭建等(2016)则以小流域作为基本评价单元,在浙江省构建了基于模糊可拓方法的泥石流危险性区域预报模型。随着统计学理论不断发展以及全国范围内关于地质灾害调查的不断深入、数据样本足够丰富,越来越多的学者也将信息量法引入地质灾害风险性评价中来(王小江等,2014;王佳佳等,2014)。信息量法的优势

在于可以简单有效地采用客观数据提供的信息计算出因素的各分类的信息量,从而更客观地反映各因素对地质灾害发生的影响程度。王裕琴等(2015)在云南全省范围内构建基于信息量法的地质灾害气象预警模型,开发了应用系统,并投入使用取得良好效果,但范围较大,针对性不强。然而对于在红河州区域内的地质灾害气象预警却研究甚少,仅周秀美等(2012)对红河州 183 条地质灾害样本进行降雨量分析,得出各地地质灾害分区临界雨量及地质灾害统计预报方程,从而实现地质灾害的预报。

本文将以前云南省红河州滑坡监测示范区为例,综合考虑地质灾害的诱发因子、地质环境因素,针对监测示范区采用 100 m×100 m 的预警单元,并基于信息量模型构建地质灾害气象风险预警体系,对该区的降雨诱发型地质灾害风险进行评估,从而直接为区域地质灾害防灾减灾管理提供依据,提升地质灾害应对能力,最大程度上减少灾害造成的损失,为区域经济发展提供有力保障,还可以结合长期预警结果数据为决策部门土地利用规划方案的制定提供参考和理论支撑。

1 研究区概况

本次以红河州滑坡监测示范区(包括金平、河口、屏边三县)作为研究区域。研究区位于东经 102°31′34″~104°16′46″、北纬 22°26′19″~23°23′21″,南与越南接壤,国界线长达 311.06 km,其中水界 123.2 km,总面积约 6 915 km²,至 2013 年底,总人口约 61.48 万,区内交通以公路为主,有红河航道及公路与越南相通(图 1),是我国西南地区通往东南亚的重要交通枢纽;研究区地处北回归线以内低纬度地区,属低纬度亚热带湿润山地季风性气候,由于受构造运动影响,区域内地形起伏,海拔高差变化大,气候垂直变化明显,年均气温 19.1℃,年均降雨量为 2 000.9 mm,雨季多集中于每年的 6、7、8 月,常伴有地质灾害的发生。

研究区属于典型的山区,山峰耸立,地形复杂,海拔 76.4~3 074.0 m,其中海拔高于 800 m 的区域占整个研究区的 70.21%;区内河流溯源侵蚀强烈,水系密度较大,陡坡地分布面积广大,重力地质作用活跃,不稳定岩土体分布广泛,同时地处欧亚板块与印度洋板块碰撞带附近,地壳抬升幅度大,活动断裂密集,破坏性地震频繁,复杂的地质背景和脆弱的地质结构为滑坡、泥石流等地质灾害的形成和发展提

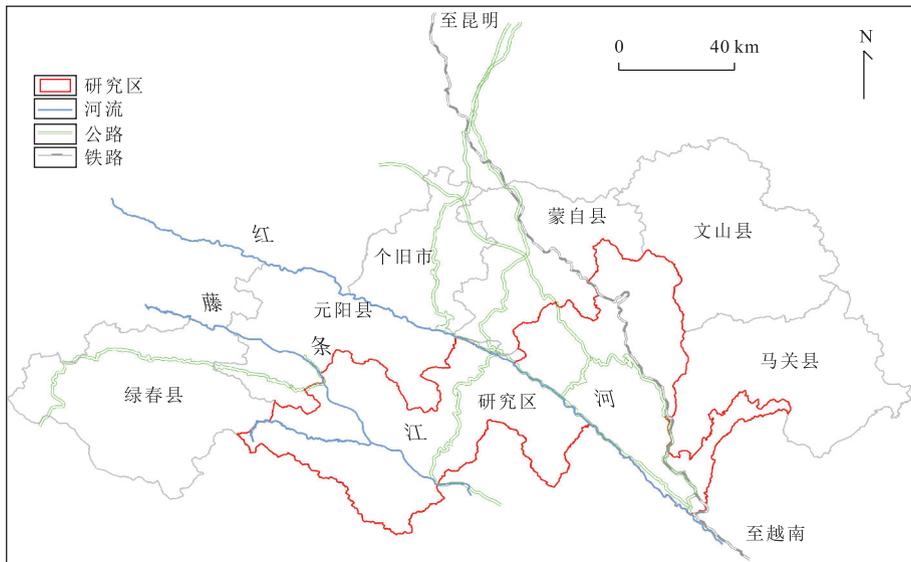


图1 研究区地理位置

Fig.1 The geographical location of study area

供了物质基础与环境条件;根据相关地质调查数据显示,研究区内地质灾害点(包括潜在隐患点)累计992个,其中滑坡731处,泥石流118处,崩塌41处,不稳定斜坡98处,地面塌陷4处,灾害体的威胁对象多为居民、公路、耕地等。

2 地质灾害气象风险预警

地质灾害的发生往往是各种复杂的因素共同导致形成的,一般来说,可以概括为由灾害诱发因子、地质环境因素共同作用的结果,故对研究区地质灾害进行气象风险预警,则首先需要诱发因子、地质环境分别进行危险性分析以及敏感性分析。

2.1 灾害诱发因子危险性分析

研究区兼具季风气候以及低纬气候的特点,旱、雨季分明,受地貌多样性影响,雨季局地暴雨发生频繁。多年统计结果表明,有70%的滑坡和90%的泥石流发生在雨季,说明地段性高强度降雨过程是激发滑坡、泥石流的主要自然因素。因此,考虑将降雨作为本次地质灾害气象风险预警模型的唯一诱发因素。

降雨量作为诱发滑坡泥石流地质灾害的重要因素,很大程度上指示了地质灾害发生的可能性,一般来说,在降雨发生当天及前几天,大部分地质灾害的发生都会伴随有降雨的发生,并且规律性非常明显,因此,短时强降雨对地质灾害具有明显的诱发效应。参照王裕琴等(2015)在云南省地质灾害气象预警系统中对灾害发生当天及前几天累计有效降雨量的大

量统计分析,其结果表明前7天累计降雨量与地质灾害发生的相关性最为明显,因此,选取前7天累计降雨量与当日预报降雨量组合指标作为降雨特征指标并引入有效降雨量概念,有效降雨量采用日综合有效累积降雨量的计算模型,如公式(1)所示:

$$R_c = R_0 + \sum_{n=1}^7 a^n R_n, \quad (1)$$

式中: R_c 为有效降雨量; R_0 为当天预报降雨量; R_n 为前第 n 日降雨量; a 为衰减系数。一般认为,某一天的降雨量在岩土体中的赋存或对岩土体力学强度的影响15天后将几乎衰减到可以忽略不计(冯杭建,2013)。结合Bruce and Clark(1969)的研究成果,本文 a 取值0.84。

为进一步反映前期有效降雨量引发地质灾害的危险性程度,定义降雨诱发指数 R ,对每天更新的气象降雨数据进行实时处理,如公式(2)所示:

$$R = (m - 1) + \frac{R_c - R_1}{R_n - R_1}, \quad (2)$$

式中: m 为有效降雨量 R_c 所处降雨临界值区间对应的预警状态级别值($m = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$); R_1 为有效降雨量 R_c 所处临界值区间的下限; R_n 为有效降雨量 R_c 所处临界值区间的上限。

降雨临界值即降雨阈值,是降雨引发地质灾害预警预报的最重要的参数之一,不同区域对降雨因素诱发地质灾害的敏感程度不同(Gariano *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015)。通过分析统计研究区历史地质灾害事件与灾害发生当日预报降雨量以及前7日累积有效雨量关系,同时结合云南省地质灾害预警预

表 1 降雨特征临界值

Table 1 The critical value of rainfall

降雨等级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	5 级以上
有效降雨量(mm)	0~30	30~80	80~120	120~160	160~260	>260

报系统中对滇南地区降雨特征临界值的划分,将红河州研究区有效降雨量划分为以下 5 个等级,其具体临界值范围见表 1。

每日降雨预报数据由云南省气象局实时发布,前 7 日实际降雨数据由云南省红河州各气象区域站汇总提供,最终,将前 7 日实际降雨数据以及当日预报数据经过以上处理后导入 ArcGIS 平台,并将该点处降雨诱发指数通过插值计算合理分配到 100 m×100 m 栅格分析单元中。

2.2 地质环境控制因子敏感性分析

地质灾害的发生不仅与动态诱发因素密切相关,同样也受众多静态地质环境因素的控制,例如基础地质、地形地貌等,此类因素一般保持静态不变,为地质灾害形成提供了必要的环境条件,同时也决定了区域地质灾害的总体格局及类型、规模等发育特征。因此,影响地质灾害的地质环境因子体系的构建是整个预警模型的重要部分。本文根据云南省滑坡泥石流形成机理及特点,结合红河州研究区的自

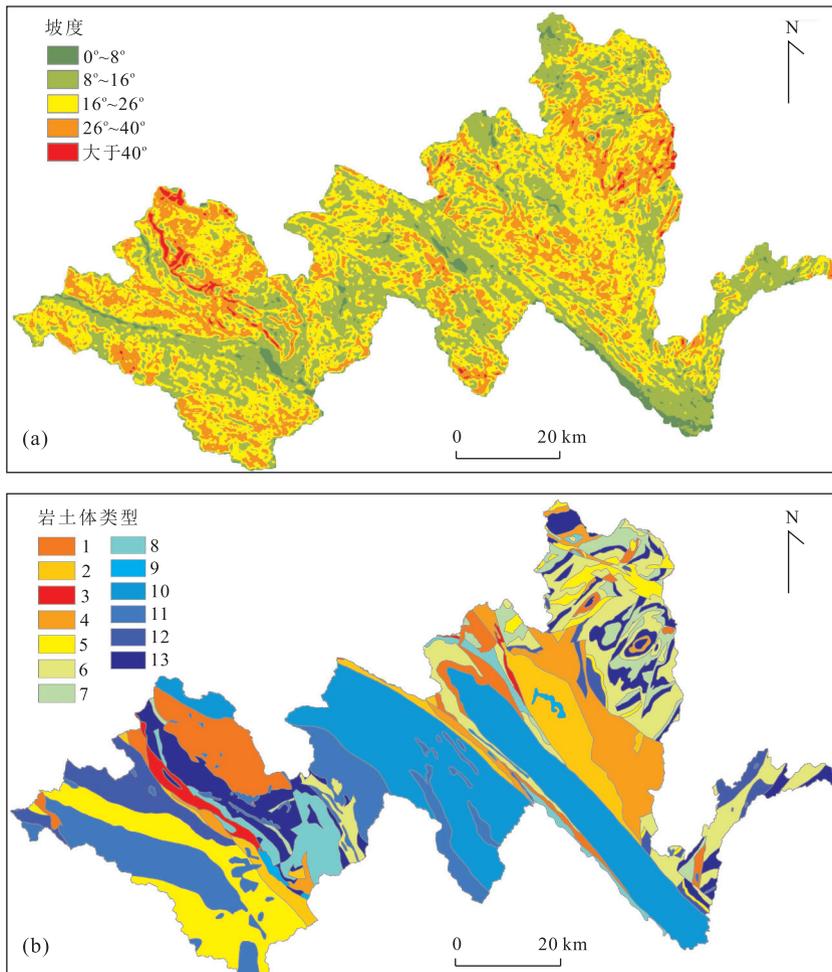


图 2 研究区坡度(a)和岩土体类型(b)空间分布

Fig.2 The spatial distribution of slope gradient (a) and rock and soil types (b) in the study area

1.层状软硬相间碎屑岩岩组;2.层状软硬相间浅变质岩岩组;3.薄—中层极软—较硬含煤砂岩、泥岩岩组;4.层状软硬相间碎屑岩夹碳酸盐岩岩组;5.层状软的页岩、泥岩夹硬的砂岩岩组;6.层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩夹碎屑岩岩组;7.层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩、碎屑岩岩组;8.层状、块状较硬—坚硬喷出岩岩组;9.多层土体;10.块状坚硬片麻岩、混合岩、变粒岩岩组;11.块状坚硬侵入岩岩组;12.中厚层状坚硬砂岩、砾岩夹软弱薄层页岩、泥岩岩组;13.中厚层状强岩溶化较硬—坚硬灰岩、白云岩岩组

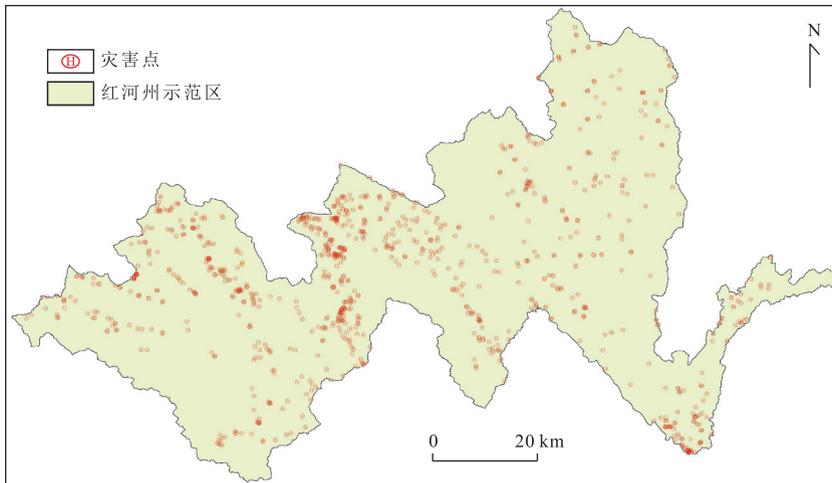


图 3 研究区地质灾害点(潜在灾害点)分布

Fig.3 The distribution of geological hazards (potential disaster points) in the study area

然地理特征,同时考虑到在 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 范围内坡度对地质灾害的发生具有一定的影响,因此选取与滑坡泥石流地质灾害密切相关的地貌、坡度、地震烈度、水网密度、岩土体类型、构造强度、路网密度、矿山环境影响共 8 个因素作为滑坡泥石流等地质灾害的地质环境控制因素.将每个地质环境因子在研究区域内统一划分为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的规则栅格分析单元,便于后期叠加计算,图 2 分别为研究区坡度空间分布图以及岩土体类型空间分布图.

相同降雨事件的作用下,由不同地质环境背景因子差异导致地质灾害发生可能性大小可采用地质灾害敏感性指数(Z)表示.本文预警预报模型地质灾害敏感性指数是采用各地质环境影响因子信息量值加权叠加计算得出.基于信息量模型的地质灾害敏感性指数计算是以研究区滑坡泥石流地质灾害点分布现状为基础(图 3),文中所用灾害点数据来源于云南省地调局 2007 年全省地质灾害详查数据,首先将采集到的各个评价因子信息作为一个单独的图层,然后将各评价因子图层分别与地质灾害点在 ArcGIS 中作空间相交分析,在单个地质环境影响因子图层中统计每种类型栅格单元中灾害点分布的数量以及研究区内该类型所占栅格单元数,从而分别计算出各因素的信息量值.具体计算方法如公式(3)所示:

$$M_i = \log_2 \frac{S_0/S}{A_0/A}, \quad (3)$$

式中: M_i 代表单个因素的信息量值; S_0 为落在属于该因素栅格单元中的灾害点个数; S 代表研究区内灾害点总个数; A_0 表示研究区内含有该因素的栅格

单元数; A 表示研究区栅格单元总数.根据单元信息量计算结果,单元信息量值越高,反映该影响因素对滑坡泥石流灾害发生的影响度越高,对发生地质灾害的可能性起促进作用越大.基于以上信息量计算模型,对每个地质环境评价因子分别进行信息量计算,得到信息量计算结果如表 2 所示.

依据上表中各因素信息量值的大小,可看出路网密度中等、哀牢山中山地貌、河网密度高、块状坚硬片麻岩、混合岩、变粒岩以及层状软硬相间碎屑岩岩组等地质环境因素对地质灾害的发生有着促进作用,这些因素是云南省红河州示范区的滑坡泥石流地质灾害发育形成的主要控制条件;而坡度过于陡峭容易导致松散物源不易堆积,相对不易发生滑坡等地质灾害,因此,坡度陡峭因素信息量为负值.

最终,在 ArcGIS 平台上对每个评价单元进行各因素信息量值的加权叠加,从而得到研究区每个评价单元的地质灾害敏感性指数,计算方法如公式(4)所示:

$$Z = \sum_{i=1}^8 k_i M_i, \quad (4)$$

式中: Z 为地质环境敏感性指数, k_i 表示第 i 个因子权重值,主要反映该因子对地质灾害影响的相对重要性,通过相关专家根据每个因子对地质灾害发生的相对影响程度并结合研究区实际地质环境情况进行针对性打分,依据于此构建层次分析法模型,合理地给出每个因子的权重值 k_i ,如表 3 所示. k_i 可结合预测结果与实际发生情况的对照验证从而作适当调整.

依据上述计算得出的地质环境敏感性指数值生

表 2 研究区地质灾害环境控制因子信息量值

Table 2 The information value of environmental controls of geological disaster in the study area

评价因子	类型	信息量计算				
		S_0	S	A_0	A	M_i
断层密度	密度低	91	992	110 573	679 264	-0.827 430
	密度较低	425	992	217 360	679 264	0.421 009
	密度中等	237	992	170 894	679 264	-0.074 580
	密度较高	181	992	141 922	679 264	-0.195 480
	密度高	58	992	38 515	679 264	0.044 265
坡度	平缓	61	992	47 267	679 264	-0.178 390
	缓坡	192	992	131 930	679 264	-0.005 030
	稍陡	458	992	291 127	679 264	0.107 331
	较陡	273	992	184 224	679 264	0.021 072
	陡峭	8	992	14 716	679 264	-1.425 680
河网密度	低	243	992	166 021	679 264	0.003 223
	中等	318	992	222 490	679 264	-0.031 080
	较高	273	992	189 911	679 264	-0.022 790
	高	158	992	100 842	679 264	0.101 460
地貌	哀牢山中山亚区	627	992	342 673	679 264	0.325 265
	文山岩溶中山台地区	365	992	336 591	679 264	-0.429 470
地震烈度	Ⅵ	434	992	393 382	679 264	-0.404 600
	Ⅶ	558	992	285 882	679 264	0.418 478
矿山开采度	一般区	853	992	575 670	679 264	0.020 936
	较严重区	36	992	36 837	679 264	-0.579 530
	严重区	103	992	65 757	679 264	0.101 060
路网密度	低	433	992	418 219	679 264	-0.496 260
	较低	215	992	121 467	679 264	0.277 405
	中等	241	992	80 220	679 264	1.040 632
	较高	71	992	42 572	679 264	0.191 546
	高	32	992	16 786	679 264	0.384 446
岩土体类型	块状坚硬侵入岩岩组	135	992	83 605	679 264	0.144 931
	多层土体	5	992	3 082	679 264	0.151 694
	层状、块状较硬—坚硬喷出岩岩组	37	992	28 089	679 264	-0.148 850
	块状坚硬片麻岩、混合岩、变粒岩	302	992	154 613	679 264	0.419 519
	层状软硬相间碎屑岩夹碳酸盐岩岩组	40	992	50 917	679 264	-0.894 520
	层状软硬相间浅变质岩岩组	47	992	41 514	679 264	-0.367 300
	层状软硬相间碎屑岩岩组	87	992	49 469	679 264	0.268 123
	中—厚层状强岩溶化较硬—坚硬灰岩	46	992	58 916	679 264	-0.903 390
	中厚层状坚硬砂岩、砾岩夹软弱薄层	37	992	35 246	679 264	-0.476 300
	层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩	17	992	25 384	679 264	-1.124 750
	层状软的页岩、泥岩夹硬的砂岩岩组	112	992	67 033	679 264	0.194 188
	层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐夹碎屑岩	120	992	72 108	679 264	0.188 435
	薄—中层状板较—较硬含煤砂岩、泥岩	7	992	9 288	679 264	-0.954 380

表 3 评价因子权重取值

Table 3 The weight of evaluation factor

评价因子	地貌类型	地震烈度	断裂密度	岩土体类型	河网密度	路网密度	坡度	矿山环境影响
权重(k)	0.129 0	0.096 8	0.129 0	0.225 8	0.096 8	0.064 5	0.096 8	0.161 3

成地质环境敏感性分布图,也即区域地质灾害易发性分区图(图 4),并将红河州监测示范区地质灾害易发性划分为高、较高、中等以及低 4 个等级,其中易发性高区总面积达 325.63 km²,较高区总面积

1 317.02 km²,易发性高区与较高区主要分布于金平县内的西南山区、营盘乡铜厂乡的北部、沙依坡乡以及县城附近,河口县以及屏边县整体地质灾害易发性低,不易发生地质灾害.区内有统计以来共发生

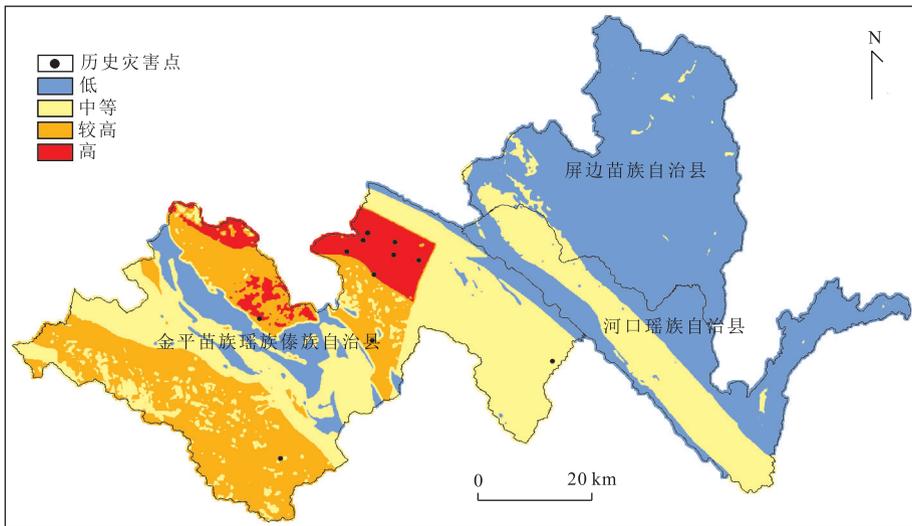


图 4 研究区地质环境敏感性分布

Fig.4 The species sensitivity distributions of geological environment in the study area

表 4 地质灾害气象预报预警等级划分

Table 4 The classification of weather forecast and early warning

预警等级	风险低	风险中等	风险较高	风险高	风险很高
预警指数	<0.235	0.235~0.770	0.770~1.155	1.155~1.485	>1.485

地质灾害 11 起,从图 4 中看,11 起灾害中 8 起发生于易发性高区,2 起发生于易发性较高区域,1 起分布于易发性中等区域,这在一定程度上验证了基于信息量模型计算地质灾害环境敏感性指数的准确性.

2.3 地质灾害气象风险预警模型构建

对降雨诱发因子以及地质环境控制因素造成地质灾害发生的可能性大小分别量化后,应用广义线性模型将动态降雨诱发因子和静态的地质环境控制因素结合起来进行预警值计算,从而进行预警等级划分,指示出研究区各区域内的地质灾害预警级别.地质灾害气象风险预警评价计算方法如公式(5)所示:

$$H = Z \times R, \tag{5}$$

式中: H 为预警指数, R 为致灾因子诱发指数, Z 为地质环境敏感性指数.

通过对该区域历史地质灾害事件和对应时间应用以上模型得出的预警值进行统计分析,同时参照云南省已建立的地质灾害气象风险预警系统中等划分结果,并在此结果上根据研究区实际地质灾害发育情况作适当的调整,将该研究区的地质灾害预警级别划分为以下 5 级,如表 4 所示.

3 预警结果

为了检验模型的预警预报能力,选择 2014—2015 年期间研究区内发生的突发性地灾事件进行回代验证.

以研究区历史上发生地质灾害的某一天(2014 年 7 月 22 日)为例,通过对相关降雨数据进行处理计算得出当天降雨诱发指数分布(图 5).图 5 中大致反映出当天研究区不同区域由降雨导致滑坡泥石流地质灾害发生的可能性大小,其中河口县、屏边县大部分区域以及金平县县城东北部降雨诱发地质灾害指数较大.

将 2014 年 7 月 22 日地质灾害的降雨诱发指数分布与地质环境敏感性分布叠加运算,得到研究区当日地质灾害气象风险预警(图 6).预警结果显示:当天研究区内河口县以及屏边县预警等级基本为低,不易发生地质灾害;预警风险高以及较高的区域主要集中在金平县,预警等级高的区域具体分布在以下地区:沙依坡乡妈卡坡村、沙依坡乡阿哈米村、阿得博乡阿得博村北部、大寨乡箐脚村、大寨乡大寨村中部和西部、大寨乡白沙坡村部分地区、阿得博乡高兴寨村北、阿得博乡水源村和阿得博乡箐口村部分地区.结果划分的预警等级与实际调查的地质灾

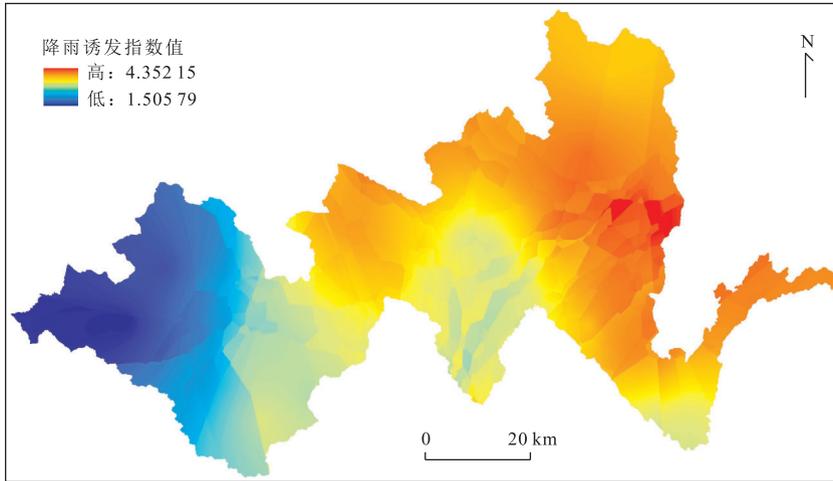


图 5 研究区降雨诱发指数分布

Fig.5 The distribution of rain-triggered index in the study area

表 5 研究区地质灾害气象预警等级与实际调查灾害点的对比(2014-07-22)

Table 5 The comparison between evaluation results and the investigative hazards distribution of study area

预警等级	分布面积 (km ²)	a	地质灾害点个数	b	b/a
低	4 382.05	65.26%	488	49.19%	0.75
中等	1 749.51	26.05%	282	28.43%	1.09
较高	487.83	7.26%	178	17.94%	2.47
高	95.61	1.42%	44	4.44%	3.12

注:a 为本预警等级的面积占研究区总面积的百分比;b 为落在该等级内的地质灾害点个数占地质灾害点总数的百分比;b/a 为本预警等级中的地质灾害点密度与研究区总的地质灾害风险密度的比值。

害点分布的对比见表 5.

图 6 中黑点表示当日在该区域中共发生 4 起滑坡灾害,其中有 3 起落在预警高区,1 起落在预警等级较高区域.

此外,通过对研究区内 2014—2015 年发生的 11 起地质灾害分别进行预警结果比对,其中有 9 起历史灾害事件对应当日的预警高区与预警较高区域,2 起对应当日的风险中等区域(表 6),预警准确率达 81.8%,笔者认为红河州示范区灾害的发生与预警的结果具有较好的一致性,因此也认为本文提出的基于信息量法地质灾害预警模型的预测结果合理.

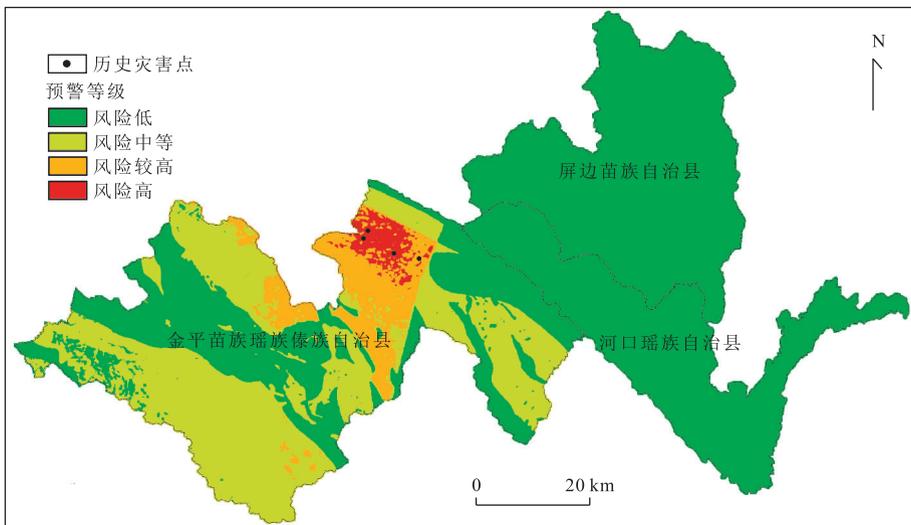


图 6 红河州示范区地质灾害气象风险预警(2014-07-22)

Fig.6 The geological disaster meteorological risk early warning in the Honghe demonstration district

表6 研究区历史灾害事件与对应预警级别对照(2014—2015年)

Table 6 The comparison table of historical disaster events and corresponding warning level

发生日期	所属县	乡镇、村组及具体地点	类型	对应预警等级
2014-08-15	金平县	金水河镇普角村委会普角村	滑坡	较高
2014-08-11	金平县	铜厂乡勐谢村委会新寨村	滑坡	高
2014-08-10	金平县	马鞍底乡中寨村委会黄家寨	滑坡	中等
2014-07-23	金平县	金河镇哈尼田村委会上卢下寨	滑坡	高
2014-07-22	金平县	沙依坡乡沙依坡村委会邮电所上方	滑坡	高
2014-07-22	金平县	大寨乡敬老院	滑坡	高
2014-07-22	金平县	大寨乡中心小学	滑坡	较高
2014-07-22	金平县	沙依坡乡阿哈迷村委会丫口寨	滑坡	高
2014-07-21	金平县	沙依坡乡土马村委会骂居迷村	滑坡	中等
2015-10-10	金平县	阿得博乡阿得博村委会刘家寨	滑坡	较高
2015-10-09	金平县	阿得博乡阿得博中学	滑坡	高

4 结论

(1)信息量模型是效果良好、简单易行的灾害危险性评估方法,通过分析各影响因子的信息量大小来计算地质灾害环境敏感指数,减少了人为因素的干扰,避免了计算过程中主观因素干预过多的弊端,更客观地反映了地质灾害受地质环境条件的影响。

(2)预警模型中因子权值、降雨阈值等参数可根据预警结果反馈情况和地质灾害发生机理研究结果进行调整,预警方法具有可优化性,为后期雨量数据加密后分析地质灾害与降雨量、地质环境条件的关系提供模型优化接口,提高模型的实用性和可靠性。

(3)所建立的地质灾害综合气象预警模型表明,将气象因素与地质和环境因素综合考虑纳入模型是可行的,是提高地质灾害气象预警水平有效的途径。首次在研究区采用 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的网格单元,预报精度范围可提高到乡村级,预警准确率达81.8%。

(4)地质灾害时时刻刻威胁着人民的生活安全,因此在不断训练红河州示范区预警模型参数保证预警准确率的同时,下一步需要将该地质灾害气象预警模型投入实际系统中使用,开展相关数据库建设工作,使地质灾害信息、气象信息、防治工程等信息更全面,从而实现每日地质灾害气象预警的自动化。

References

Bruce, J. P., Clark, R. H., 1969. Introduction to Hydrometeorology. Pergamon Press, London, 252—270.

Chen, X. W., Pei, Z. Y., Wang, F., et al., 2016. GIS-Based Assessment of Rainstorm-Induced Geological Hazards Risk in Enshi Autonomous Prefecture. *Journal of Geo-Information Science*, 18(3): 343—352 (in Chinese with English abstract).

Chu, H. B., Mu, H. D., Wang, J. Z., et al., 2003. Application of Analytic Hierarchy Process Zoning Hazard Degree of Geologic Disaster in Taihang Mountain Region. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14(3): 125—129 (in Chinese with English abstract).

Feng, H. J., Tang, X. M., Zhou, A. G., 2013. Study on Relationship between Rainfall Duration and Occurrence of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Application Examination. *Journal of Natural Disasters*, 22(1): 159—168 (in Chinese with English abstract).

Feng, H. J., Zhou, A. G., Tang, X. M., et al., 2016. Development and Distribution Characteristics of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Regional Forecast. *Earth Science*, 41(12): 2088—2099 (in Chinese with English abstract).

Gariano, S. L., Brunetti, M. T., Iovine, G., et al., 2015. Calibration and Validation of Rainfall Thresholds for Shallow Landslide Forecasting in Sicily, Southern Italy. *Geomorphology*, 228: 653—665. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.019

Gou, M., 2009. Developing Characteristics and Preventions of Geological Disasters in Yunnan Province. *Journal of Hebei University of Engineering (Social Science Edition)*, 26(2): 15—17 (in Chinese with English abstract).

Inagaki, K., Sadohara, S., 2006. Slope Management Planning for the Mitigation of Landslide Disaster in Urban Areas. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1): 183—190. doi: 10.3130/jaabe.5.183

Li, H., Wu, J. J., Li, C. F., et al., 2010. BP Neural Network Model and Its Application to the Geological Hazard Warning in Henan. *Journal of Safety and Environment*, 10(2): 119—122 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. Q., Jiang, Q. O., Zhan, J. Y., 2008. Design and Application of Geo-Hazard Early-Warning Model. *Journal of Engineering Geology*, 16(3): 342—347 (in Chinese with English abstract).

- Ma, T.H., Li, C.J., Lu, Z.M., et al., 2015. Rainfall Intensity-Duration Thresholds for the Initiation of Landslides in Zhejiang Province, China. *Geomorphology*, 245: 193–206. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.016
- Ma, Y., Li, S.Z., Xia, Z., et al., 2014. Characteristics of Hazardous Geological Factors on Shenhu Continental Slope in the Northern South China Sea. *Earth Science*, 39(9): 1364–1372 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G. F., 2006. PP-ES Method for Predicting Hazard Grades of Meteorological-Geological Disasters in Yunnan Province. *Meteorological Science and Technology*, 34(6): 745–749 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.J., Yin, K.L., Xiao, L.L., 2014. Landslide Susceptibility Assessment Based on GIS and Weighted Information Value: A Case Study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(4): 797–808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.J., Sun, S.Q., Lu, P.F., 2014. Application of AHP to Geological Hazards Risk Assessment in a County, Chongqing. *Earth and Environment*, 42(3): 419–423 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.Q., Yang, Y.D., Zhou, C.Q., et al., 2015. Meteorological Early Warning of Geo-Hazards System in Yunnan Province Based on GIS Spatial Analysis. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26(1): 134–137, 144 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.R., Shi, J.S., Zhang, C.S., et al., 2009. Geo-Hazard Activity Intensity Evaluation: Theory, Methods and Practice. *Geological Bulletin of China*, 28(8): 1127–1137 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.P., Zhang, Q.X., Tang, H.M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889–895 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.P., Mei, H.B., Li, J.H., et al., 2016. Landslide Displacement Prediction based on Varying Coefficient Regression Model in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 41(9): 1593–1602 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., Miao, Y., Cheng, L., et al., 2012. Research on Critical Precipitation and Forecasting Methods of Geological Hazards of Honghe Prefecture. *Yunnan Geographic Environment Research*, 24(3): 37–42 (in Chinese with English abstract).
- 陈曦炜, 裴志远, 王飞, 2016. 基于 GIS 的贫困地区降雨诱发型地质灾害风险评估——以湖北省恩施州为例. *地球信息科学*, 18(3): 343–352.
- 褚熾斌, 母海东, 王金哲, 等, 2003. 层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用. *中国地质灾害与防治学报*, 14(3): 125–129.
- 冯杭建, 唐小明, 周爱国, 2013. 浙江省泥石流与降雨历时关系研究及应用检验. *自然灾害学报*, 22(1): 159–168.
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2016. 浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报. *地球科学*, 41(12): 2088–2099.
- 苟敏, 2009. 云南省地质灾害的发育特征及防治对策. *河北工程大学学报(社会科学版)*, 26(2): 15–17.
- 李华, 吴俊俊, 李长发, 等, 2010. 河南省汛期地质灾害预警的 BP 神经网络模型及应用. *安全与环境学报*, 10(2): 119–122.
- 刘兴权, 姜群鸥, 战金艳, 等, 2008. 地质灾害预警预报模型设计与应用. *工程地质学报*, 16(3): 342–347.
- 马云, 李三忠, 夏真, 等, 2014. 南海北部神狐陆坡区灾害地质因素特征. *地球科学*, 39(9): 1364–1372.
- 彭贵芬, 2006. 云南气象地质灾害危险等级 PP-ES 预报方法. *气象科技*, 34(6): 745–749.
- 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽, 2014. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例. *岩石力学与工程学报*, 33(4): 797–808.
- 王小江, 孙书勤, 卢鹏飞, 2014. 层次分析法在重庆某县地质灾害危险性评价中的应用. *地球与环境*, 42(3): 419–423.
- 王裕琴, 杨迎冬, 周翠琼, 等, 2015. 基于 GIS 空间分析技术的云南省地质灾害气象风险预警系统. *中国地质灾害与防治学报*, 26(1): 134–137, 144.
- 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等, 2009. 地质灾害活动强度评估的原理、方法和实例. *地质通报*, 28(8): 1127–1137.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889–895.
- 喻孟良, 梅红波, 李冀骅, 等, 2016. 基于变系数回归的三峡库区滑坡位移预测. *地球科学*, 41(9): 1593–1602.
- 周秀美, 苗芸, 程林, 等, 2012. 红河州地质灾害临界雨量及预报方法初探. *云南地理环境研究*, 24(3): 37–42.