

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.023

甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨

郭富赞^{1,2}, 宋晓玲¹, 谢煜¹, 孟兴民²

(1. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050, 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 甘肃省是全国 4 大滑坡、泥石流分布区。境内滑坡、泥石流主要分布在西秦岭山地、黄土高原和祁连山地。根据历年灾害资料研究, 降水引发的地质灾害占年度地质灾害的比例为 45% ~ 95%, 且具有突发性、群发性和滞后性等特征, 造成了严重的人员伤亡和经济损失。引发滑坡、泥石流主要有连阴雨、局地暴雨、前期降水-区域暴雨和区域性大暴雨。通过对降水与滑坡、泥石流关系研究, 分类型建立了甘肃省滑坡 24 h 趋势气象预警模型和滑坡、泥石流实时降雨预警模型, 并在 2013 年陇东南连续强降水过程中应用, 取得了很好的预警效果。

关键词: 甘肃; 地质灾害; 气象预警; 模型; 应用

中图分类号: P694; P66

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0127-07

A discussion on the geological hazards meteorological warning system in Gansu province

GUO Fuyun^{1,2}, SONG Xiaoling¹, XIE Yu¹, MENG Xingmin²

(1. Gansu Provincial Geological Environment Monitoring Institute, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Gansu province is one of four major landslides and debris flow distribution area of China. It distributes in Western-Qinling Mountain, the Loess Plateau and Qilian Mountain. According to disaster information research, the ratio of annual precipitation caused by geological disasters as 45% -95%. Geological disasters are abrupt mass and lag, causing serious casualties and economic losses. The main types of is continuous rains, antecedent precipitation-regional storm and heavy rainfall in the regional, triggered landslides and debris flow. Through research on the relationship between precipitation and landslides and debris flow, established landslide meteorological early-warning model and real-time rainfall model of landslides and debris flows in Gansu province. The model's effect has been proved during continuous heavy rain in Southeast Gansu in 2013.

Keywords: Gansu province; geological hazards; meteorological early warning; model; used

0 引言

地质灾害的形成是地质条件、气象条件、人类工程活动等多种因素综合作用的结果, 其中降水条件是引发地质灾害的主要因素之一。因此, 从降水这一关键因子入手, 与地质灾害的发育特点相结合, 研

究降水与地质灾害的关系成为地质灾害预报预警的关键问题。

近年来, 国内以针对降水为主要指标开展了相应的地质灾害气象预警研究。刘传正, 等^[1]开展了中国地质灾害气象预警研究, 先后建立了地质灾害隐式和显式预报两代模型; 宋光齐, 等^[2]通过对地质

收稿日期: 2014-08-18; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB744703); 科技部支撑计划项目(2011BAK12B06)

第一作者: 郭富赞(1970-), 男, 甘肃景泰人, 高级工程师, 博士研究生, 从事地质灾害防灾减灾方面的研究工作。E-mail: fyg5191@163.com

灾害发生与气象因素的耦合关系研究,建立了基于地质灾害危险性和降水发生概率的四川省汛期地质灾害气象预报预警模型;陈百炼,等^[3]利用 GIS 技术结合地质和气象资料分析,提出了基于 GIS 的贵州省地质灾害预报预警方法;张桂荣^[4]根据浙江省地质灾害调查资料,结合雨季实时降雨量与降雨量预测信息,建立了基于 WEBGIS 平台浙江省突发性地质灾害预警预报系统;周玉才,等^[5]通过江西省境内滑坡与降水关系研究建立了用日综合雨量预测滑坡发生的数学模型;张铁军等^[6]从强降水和持续性降水这一诱发地质灾害的关键因素入手,建立开发基于地理环境、地质特征和气象条件下山洪地质灾害的预警预报系统模型;陈平,等^[7]结合湖南省地质背景因素、地质灾害发生特点,选定日雨量和小时雨量作为气象数据来源,基于 GIS 形成了湖南省地质灾害气象预警方法体系;高华喜,等^[8]通过对降雨与滑坡灾害的相关性分析,探讨了滑坡预警预报阈值;唐红梅,等^[9]对重庆市降雨与滑坡的关系进行了研究,并建立滑坡预警模型;陈静静,等^[10]在湖南降雨特征研究的基础上,结合致灾雨量阈值给出的不同类型降雨对地质灾害发生的贡献率、雨量阈值和灾害发生频次的分布图,直观显示了全省分县致灾临界雨量及不同降雨型地质灾害的高发区域。以上这些研究表明基于降水与地质灾害关系分析基础上的地质灾害气象预警研究是可行的。

突发地质灾害给甘肃省造成了严重的人员伤亡和经济损失。据统计,2000~2013 年期间,甘肃省共发生地质灾害 9104 起,导致 2162 人死亡,直接经济损失 228.7×10^8 元^[11]。历史灾情研究表明,因降水诱发灾害占地质灾害总数的 45%~95%^[12]。甘肃第一代地质灾害气象预警系统是由甘肃省地质环境监测院联合兰州中心气象台于 2009 年共同研究的基于日有效降水量的预警模型^[13]。但是由于过去的灾情搜集工作不够全面,统计的灾情资料较少,并未分类建立预警指标和模型,不能满足目前精细化预报的要求。因此针对目前甘肃省地质灾害减灾防灾的需求,本次在以往研究成果基础上,采用地质灾害环境空间分析预警理论方法,分析境内地质灾害的发育特征,针对滑坡、泥石流提出了不同时间段的预警阈值,并分别构建了基于有效降雨和日降水量的滑坡预警模型和基于实时降雨监测的泥石流实时预警模型,并在实践中指导甘肃省地质灾害气象预警工作,取得了很好的效果,研究成果也可供国内其他同行参考。

1 区域地质灾害时空分布特征

1.1 空间分布特征

受地质环境条件影响,甘肃省地质灾害分布密度和发生频率由东南向西北呈递减趋势(图 1),基本可分为三大区域:陇南山地、黄土高原和河西山地,其分布特点各有不同^[14]。陇南山地地质灾害类型以滑坡、泥石流、崩塌为主,是地质灾害分布密度最大、发生频率最高的地区,且具有群发性特征。黄土高原地区地质灾害类型以崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷(采煤形成)为主,地质灾害发生频率仅次于陇南山地,以局地性暴发为主兼有群发性特征。河西的祁连山、龙首山、合黎山山麓地带,地质灾害类型以泥石流、滑坡为主,发生频率较低,主要为局地性暴发。

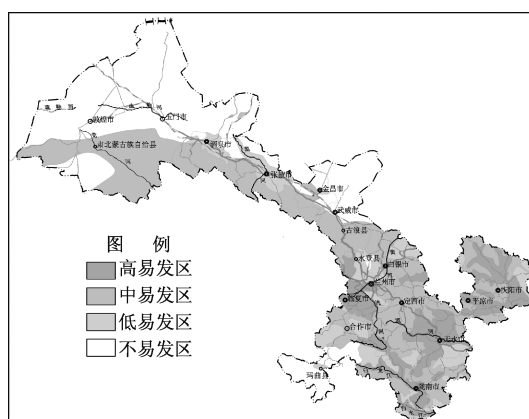


图 1 甘肃省地质灾害易发区图

Fig. 1 Geological disaster prone areas in Gansu province

1.2 地质灾害时间分布

地质灾害高发期为 6~9 月主汛期,灾害类型以滑坡、崩塌、泥石流为主^[15](图 2);2~5 月冰雪冻融期次之,灾害类型以崩塌、滑坡为主;10 月、11 月、12 月、1 月为低发期,主要诱发因素为人类工程活动,灾害类型以崩塌、滑坡为主。

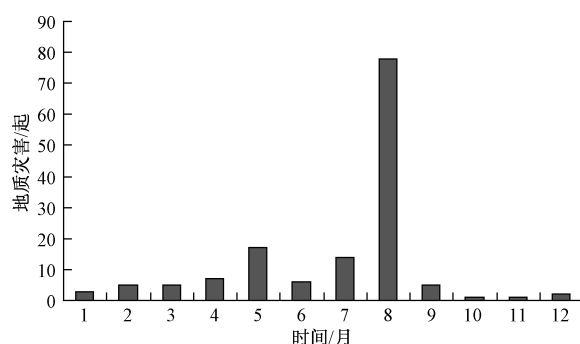


图 2 地质灾害月分布柱状图

Fig. 2 Months of geological disaster distribution histogram

2 降水引发地质灾害的特征

地质灾害的发生与气象因素有很大的关系,降水在甘肃引发的地质灾害具有以下特征。

2.1 突发性特征

局地强对流天气形成的短时强降水强度大,历时短,覆盖面积较小。可形成突发性崩塌、滑坡、泥石流灾害。尤其是泥石流灾害,往往形成严重的人员伤亡和经济损失。典型的如舟曲 8.8 特大泥石流灾害,距离县城 15 km 的东山站记录的 1 小时降水量达 77.3 mm,过程降水量达 96.6 mm,造成严重的人员伤亡和经济损失^[14]。

2.2 群发性特征

区域性的暴雨往往是诱发滑坡、泥石流的主要因素。据调查和统计,5 月下旬~9 月上旬,为甘肃大暴雨或暴雨发生期,其中 7 月上旬~8 月中旬,为大暴雨或特大暴雨集中期,同时也是崩滑流的集中发生期。如 2013 年陇东南部“7·25”群发性地质灾害,天水、平凉、庆阳等地区形成了滑坡、泥石流数量近千次。

2.3 滞后性特征

大型滑坡一般出现在降雨过程后期,甚至降雨结束后数天^[16]。典型的如天水珍珠沟滑坡,在经历了 2013 年 4 次强降水过程后在 2013 年 12 月 21 日发生大规模滑动。

3 地质灾害预警模型研究

3.1 研究思路

从理论上讲,地质灾害气象预警指标应全面考虑前期岩土体含水量、未来降水以及实时降水情况。但目前准确获取前期岩土体含水量还不具备条件。因此要解决问题必须从宏观上结合地质环境条件和气象条件综合分析研究,建立适合的模型,得出有效的地质灾害气象预警指标。目前国内采用的地质灾害气象预警多是把崩滑流灾害考虑在一起,但实际情况是泥石流的激发雨量比滑坡小,且往往为短历时强降雨。因此考虑地质灾害预警的实际需求,本次将分别建立泥石流和滑坡的预警模型,并考虑如前期降水、新近强震、地面高程等关键影响因素。

3.2 滑坡预警指标和模型

3.2.1 滑坡与降水关系

据统计降雨类型的滑坡约占滑坡总数的 70%,同时调查表明 95% 的降雨型滑坡发生于雨季^[17]。

对 1967~2010 年 80 个气象站逐日降水量资料与

滑坡灾害的关系分析表明,滑坡与雨型、前期降水等具有显著关系,根据甘肃实际降雨可归类为连阴雨型、暴雨(雷暴)、前期一暴雨型、持续暴雨型(表 1)。根据对汶川地震、岷县漳县 6.6 级地震研究表明,地震烈度大于 6 度区时,各种雨型对应的滑坡临界雨量呈显著下降趋势,降幅可达 20%~50%^[18-19]。例如 2013 年 7 月 25 日,岷县漳县地震灾区烈度 VI 度区范围内降雨量仅 30 mm,就出现了大量的小型滑坡,对抢险救灾造成了严重的影响。

表 1 滑坡与雨型关系表
Table 1 Relationship between landslide and rainfall pattern

雨型	雨量特征	滑坡特征
连阴雨	日数 > 5 d, 过程 > 15 mm	分散型小型滑坡
暴雨(雷暴)	3 h > 60 mm	分散型小型为主,少量大中型
前期一暴雨	前期 > 60 mm, 1 h > 40 mm	群发性滑坡,规模不等
持续暴雨	24 h > 100 mm	群发性滑坡,规模不等

3.2.2 滑坡预警模型构建

前述分析表明,滑坡与雨型、过程等有着直接的关系。根据历史滑坡灾害资料、降雨资料和灾害易发度综合统计分析,并借鉴国内外研究应用成果,建立基于综合有效累积降雨量的滑坡 24 h 趋势预警模型和基于实时雨量的滑坡实时预警模型。

(1) 滑坡 24 h 趋势预警模型

基于综合有效累积降雨量,并考虑地震影响,建立滑坡 24 h 趋势预警模型。

$$R_L = (aR_i) + bR_F \tag{1}$$

式中: R_L 为综合有效累积雨量, R_i 为前 i 天实测雨量,包括当日最新实况雨量($i = 0 - 4$), R_F 为 24 h 预报雨量。 a 为前期降雨影响时间衰减系数,一般取 0.5~0.8, b 为地震烈度修正系数,取 1.25~2.0。对应不同的灾害预警等级和灾害易发度等级,两者共同确定某一综合有效累积雨量值为该易发区内该预警等级的指标临界值,具体数值可根据当地情况进行动态调整。

(2) 基于实时雨量的滑坡预警模型

目前甘肃省气象、水利、国土等部门建设的雨量计接近 4000 处,网格密度 5~30 km²,基本可以满足滑坡实时监测预警。因此综合考虑不同雨型特征,建立基于实时监测的区域滑坡预警模型。采用临界雨量系数来表征:

$$Y_H = C (R_0 + R_1) / R_T \tag{2}$$

$$Y_H = C (R_0 + R_3) / R_T \quad (3)$$

$$Y_H = C (R_0 + R_{24}) / R_T \quad (4)$$

式中: Y_H 滑坡临界雨量系数, C 为前期雨量影响系数,取 1.0 ~ 1.2; R_0 为当日降水的初始强度,采用 10 min 雨量表示,当 10 min 雨量大于 3 mm 时开始计算^[20], R_1 为 1 h 临界雨量, R_3 为 3 h 临界雨量, R_{24} 为 24 h 临界雨量,包括当日最新实况雨量($i = 0 \sim 4$), R_T 为不同历时暴雨,可根据最大 24 h 暴雨求取。

$$R_T = ST^{m-1} \quad (5)$$

式中: S 为雨力系数($T = 1$ 的暴雨强度), T 为降

雨历时; n 为暴雨衰减指数。

$$n = 1 + 1.29 \lg R_1 / R_6 \quad (6)$$

$$n = 1 + 1.66 \lg R_6 / R_{24} \quad (7)$$

公式(6)适用于 1 h、3 h、6 h 暴雨雨量计算;公式(7)适用于 12 h 和 24 h 暴雨雨量计算。

3.2.3 滑坡气象预警等级划分

根据全国统一的地质灾害气象等级,将甘肃省地质灾害气象预警等级划分为 4 个等级(表 2),当预报出现 1 ~ 3 级地质灾害时,对外发布预报或预警。

表 2 滑坡气象预报等级划分

Table 2 Grade classification of landslide forecast

预报等级		R_L (mm)	Y_H	可能性	发生情况
一级	红色	1 h 大于 >60 或 24 h 大于 120	1.10 ~ 1.15	可能性大	大区域群发性崩滑流
二级	橙色	1 h 在 25 ~ 60 或 24 h 85 ~ 120	1.05 ~ 1.10	可能性较大	局地群发崩滑流
三级	黄色	1 h 在 15 ~ 25 或 24 h 60 ~ 85	1.0 ~ 1.05	可能性较小	小规模滑坡
四级	蓝色	1 h < 15 或 24 h 60	0.95 ~ 1.0	可能性较小	单体滑坡

表 3 泥石流过程雨量一览表(mm)

Table 3 Process of debris flow in list of rainfall (mm)

沟名	时段	10 min	30 min	1 h	3 h	过程雨量
罗峪沟	1965.7.7	20.3	33.0	57.3	85.5	110.0
	1984.6.5	16.4	36.2	52.6		55.0
	1987.4.9	15.6	35.8	53.4	70.5	85.0
	1988.8.7	18.5	32.5	50.9	66.3	116.6
	1999.8.17	13.7	35.3	55.2	84.1	84.1
	平均值	16.9	34.56	53.88	76.6	88.1
	最小值	13.7	32.5	53.4	66.3	55.0
北峪河	1971.8.1	10.9	15.9	28.1	32.2	41.2
	1980.7.14	14.9	29.2	35.8	39.7	48.0
	1984.8.2	12.1	20.4	22.5	30.9	152.7
	1986.8.6	23.0	28.3			31.0
	1987.5.21	17.2	29.4	30.3	34.3	150.0
	平均值	15.6	24.64	29.2	34.2	84.5
	最小值	10.9	15.9	22.5	30.9	31.0
三眼峪沟	1981.5.9	8.3	19.9	22.1	32.0	37.8
	1982.8.6	24.0	38.1	39.5	39.7	45.9
	1988.8.9	19.6	33.2	40.7	46.7	52.8
	1991.6.8	12.5	23.6	25.2	25.6	25.6
	1992.4.30	12.4	25.7	28.2	28.9	28.9
	1993.6.16	9.8	21.0	27.6	30.4	36.0
	1994.8.8	22.3	26.5	26.6	26.8	62.9
桦林沟	平均值	15.6	26.9	30.0	32.9	41.4
	最小值	8.3	19.9	22.1	25.6	25.6
	1966.6.5	19.9	28.6	44.7	51.0	61.0
	1971.7.7	15.6	31.4	36.0	47.9	89
	1973.8.18	15.8	36.2	52.4	65.3	83.5
	1978.7.21	15.2	29.6	38.9	53.3	57.4
	1998.7.5	16.1	27.5	37.0	45.6	58.1
	平均值	16.5	30.6	41.8	52.6	69.8
	最小值	15.2	27.5	36.0	45.6	57.4

3.3 泥石流预警指标和方法

3.3.1 泥石流与降水的关系分析

对甘肃东部武都北峪河、舟曲三眼峪沟、天水市桦林沟、罗峪沟等典型泥石流的 22 组成灾过程研究表明:泥石流发生时的 10 min 雨强最小值为 8.3 mm,最大值为 24 mm,说明灾害性泥石流的暴雨初始雨强是非常大的;泥石流发生的时间大都集中在一场降雨的前期,主要集中于 3 h 之内,3 h 雨量达到了过程雨量的 45% ~ 100% (表 3)。

进一步研究表明,降水量与降水历时呈指数相关(图 3,表 4),相关系数在 0.89 ~ 0.99,说明引发泥石流的降水过程具备一定的规律性,四条典型泥石流发生的 10 min 雨量差别不同,在图 3 上基本重复,而随着时间的增加则出现自南而北、自西向东雨量不断增大的趋势。

表 4 典型泥石流短历时不同时段降水量关系表

Table 4 Typical short duration precipitation at different times of debris flow relation

沟名	关系式	相关系数
罗峪沟	$y = 21.047 \ln(x) + 52.77$	0.99
北峪河	$y = 6.443 \ln(x) + 28.143$	0.97
三眼峪沟	$y = 5.9031 \ln(x) + 28.396$	0.89
桦林沟	$y = 12.689 \ln(x) + 39.773$	0.99

3.3.2 泥石流临界雨量确定

根据省内各地资料状况,选用历年积累的泥石流灾害调查资料、实测大暴雨资料和历史洪水调查资料,优先选择资料较为充足完善的地方,依据上述典型泥石流研究方法,采用内插法计算全省不同时段泥石流

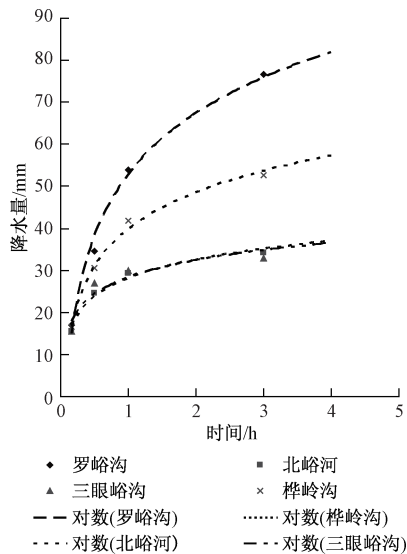


图 3 降水量与降水历时相关性图
Fig.3 Relationship between rainfall and precipitation duration

临界雨量值(表 5)。

表 5 泥石流临界雨量的一览表

Table 5 Debris flow critical rainfall 单位:mm				
时间 (min)	10	30	60(1 h)	360(6 h)
陇西黄土高原	12	30	50	65
陇东黄土高原	13	25	35	45
陇南山地(白龙江)	8	15	25	25~35
陇南山地(西汉水)	12	16	25	25~35
祁连山地	8	20	40	40~60

3.3.3 泥石流实时预警模型

泥石流的发生和雨强有很强的关联性,因此当预警判据中的临界雨量达到下限时,已开始产生泥石流,当 30 min 降雨达到临界雨量时,则可能暴发大规模的泥石流;根据牛最荣^[21]等研究,同一流域内各时段暴雨和高程具有密切关系,暴雨雨量随高程增高而增大,并呈直线相关。因此基于泥石流暴发的雨强特征,建立基于临界雨量和实时雨量为参照的泥石流预警模型,该模型考虑高程对暴雨雨量的影响。

$$Y_N = (\alpha R_0 + \beta R_s) / R_n \tag{8}$$

式中: Y_N 为临界雨量系数; R_0 为激发雨量,采用前 10 min 雨强 (mm); α 为前期雨量修正系数,取 1.0 ~ 1.2,前期无降水时取 1.0,前期有连续降水超过 10 ~ 15 mm 的混合降水时时取 1.2 (表 6); R_s 为达到 10 min 最小雨强后的实时雨量 (mm); β 为高程修正系数,取 1.0 ~ 1.6 (表 7), R_n 指泥石流临界雨量,可参照表 5 中数据取值。

Table 6 α -values in different regions			
地区	陇南山地	黄土高原	祁连山地
α	1.0 ~ 1.2	1.0 ~ 1.2	1.00

表 7 不同高程、时段 β 取值一览表						
Table 7 β -values in different height and time						
时间 (h)		1/6	1/2	1 h	3 h	6 h
高程 (m)	2400	1.0	1.15	1.30	1.50	1.60
	1800	1.0	1.10	1.20	1.35	1.40
	1600	1.0	1.05	1.10	1.17	1.20
	1200	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00

3.3.4 泥石流预警等级划分

参照滑坡预警等级,泥石流预警等级仍设定为四级,当 1/6 h、1/2 h、1 h、3 h 临界雨量系数符合表 8 的规定时,分别对应于蓝色、黄色、橙色、红色预警 (表 8)。

Table 8 Debris flow warning level				
预报等级	Y_N	可能性	发生情况	
一级 红色	1.10 ~ 1.15	可能性大	群发性泥石流,处置级	
二级 橙色	1.05 ~ 1.10	可能性较大	成灾泥石流,警报级	
三级 黄色	1.0 ~ 1.05	可能性较小	小规模泥石流,警戒级	
四级 蓝色	0.95 ~ 1.0	可能性小	泥石流形成,注意级	

4 预警模型检验

2013 年甘肃省连续遭受强降水、暴雨袭击,从 5 月 14 日开发发布预警信息,直到 9 月 24 日结束,省级地质灾害气象预警平台共发布 122 次地质灾害气象预警产品(因降雨范围、强度发生变化而有 34 个降雨日一天内发布了两次预警信息),其中红色预警信息 (I 级) 9 次、橙色预警信息 (II 级) 37 次,黄色预警信息

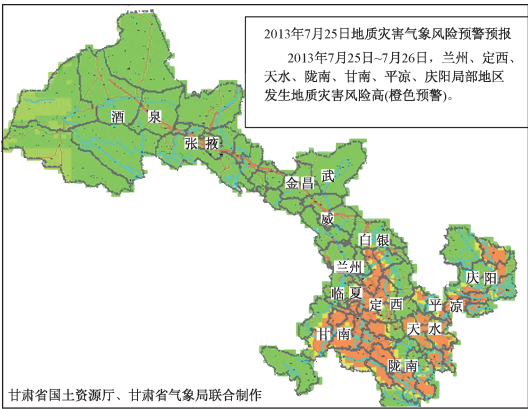


图 4 2013 年 7 月 25 日地质灾害气象预警产品
Fig.4 July 25, 2013 geological hazard meteorological warning product

(Ⅲ级)68次、蓝色预警信息(Ⅳ级)8次。成功预报367起地质灾害(图2),转移安置145868名群众,114363.9万元财产及时的进行了避让,有效的保护了人民群众生命财产安全。本年度是首次采用24h预报、临灾(2~6h)预报,预警信息量是多年平均量的150%,地质灾害区域成功预报率达22.82%。典型案例如天水6.20、甘肃东部7.25(包含岷县漳县地震灾区)(图4)、文县8.7等强降水过程引发的群发性地质灾害。

5 结论

本文针对甘肃省地质灾害气象预警需求,在前期已有模型基础上,进一步优化了滑坡24h气象预警模型,提出了滑坡、泥石流实时预警模型,并在实际中应用得到了很好的效果。

(1)滑坡与前期降雨有直接的关联,在地震烈度大于Ⅵ度区,滑坡的临界降雨量将显著降低,基于这一认识,在模型中引入了地震影响系数和前期降水量衰减系数,建立了滑坡24h趋势预警模型和1h、3h、6h实时预警模型,并界定了不同预警等级的临界雨量系数取值范围。

(2)根据典型泥石流和降雨关系研究表明,泥石流的发生和暴雨历时具有很好的相关关系,基于此给出了甘肃省不同区域、不同时段泥石流临界雨量,采用临界雨量系数建立了泥石流实时预警模型,并界定了不同预警等级的临界雨量系数取值范围。

(3)2013年的反馈资料表明,地质灾害气象预报预警产品准确率可以达到22.82%以上,可以指导地方政府的防灾减灾工作,促进防灾减灾工作。

参考文献:

- [1] 刘传正,温铭生,唐灿,等. 地质灾害防治理论与实践[M]. 北京:地质出版社,2006.
- LIU Chuanzheng, WEN Mingsheng, TANG Can, et al. Geologic hazard prevention theory and practice [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2006.
- [2] 宋光齐,李云贵,钟沛林,等. 地质灾害气象预报预警方法探讨——以四川省地质灾害气象预报预警为例[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(2): 33-36.
- SONG Guangqi, LI Yungui, ZHONG Peilin, et al. Discussion on the early warning of the geo-hazards based on the weather forecast: an example of Sichuan province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(2): 33-36.
- [3] 陈百炼,杨胜元,杨森林,等. 基于GIS的地质灾害气象预警方法初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 93-96.
- CHEN Bailian, YANG Shengyuan, YANG Senlin, et al. A case study on the meteorology early-warning of geological hazards based on GIS[J]. The Chinese Journal Hazard and Control, 2005, 16(4): 93-96.
- [4] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于WEBGIS和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1312-1317.
- ZHANG Guirong, YIN Kunlong, LIU Liling, et al. A real-time regional geological hazard warning system in terms of WEBGIS and rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1312-1317.
- [5] 周玉才,雷万荣,余广文,等. 江西省地质灾害—气象预警预报系统研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 69-75.
- ZHOU Yucai, LEI Wanrong, YU Guangwen, et al. Early warning system of geo-hazard in Jiangxi province based on weather forecast[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 69-75.
- [6] 张铁军,王锡稳,魏文娟,等. 甘肃省山洪地质灾害气象等级预报预警技术研究[J]. 甘肃科技, 2008, 24(16): 58-60.
- ZHANG Tiejun, WANG Xiwen, WEI Wenjuan, et al. Discussion on the mountain torrents geological hazard meteorological forecasting and warning of Gansu province[J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(16): 58-60.
- [7] 胡娟,闵颖,李华宏,等. 云南省山洪地质灾害气象预报预警方法研究,灾害学, 2014, 29(1): 62-66.
- HU Juan, MIN Ying, LI Huahong, et al. Meteorological early-warning research of mountain torrent and geologic hazard in Yunnan province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 62-66.
- [8] 高华喜,殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.
- GAO Huaxi, YIN Kunlong. Discussion on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1055-1060.
- [9] 唐红梅,魏来,唐云辉,等. 重庆市降雨型滑坡相关分析及预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 19(4): 18-22.

- 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, 19(4): 18-22.
- [10] 陈静静, 姚蓉, 文强, 等. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学, 2014, 19(4): 42-47.
- CHEN Jingjing, YAO Rong, WEN Qiang, et al. Hazard rainfall threshold analysis of rainfall induced geological disasters in Hunan province [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 19(4): 42-47.
- [11] 张永军, 郭富赞, 高晖, 等. 甘肃省重点地质灾害防治规划[Z]. 甘肃省人民政府, 2013.
- ZHANG Yongjun, GUO Fuyun, GAO Hui, et al. Focused on geological disaster prevention plan in Gansu province [Z]. People's Government of Gansu province, 2013.
- [12] 宋晓玲, 郭富赞, 谢煜, 等. 甘肃省地质灾害气象预警系统研究报告[R]. 甘肃省地质环境监测院, 2009.
- SONG Xiaoling, GUO Fuyun, XIE Yu, et al. Report of the study on the geological hazard meteorological warning system in Gansu province [R]. Gansu Provincial geological environment monitoring institute, 2009.
- [13] 王锡稳, 张铁军, 冯军, 等. 甘肃地质灾害气象等级预报研究[J]. 干旱气象, 2004, 31(1): 6-10.
- WANG Xiwen, ZHANG Tiejun, FENG Jun, et al. Discussion on the early warning of the geo-hazards based on the weather forecast of Gansu province [J]. Arid Meteorology, 2004, 31(1): 6-10.
- [14] 赵洪涛, 孙会国, 王文瑞, 等. 基于GIS甘肃中南部滑坡泥石流活动强度评价[J]. 中国沙漠, 2005(6): 897-903.
- ZHAO Hongtao, SUN Huiguo, WANG Wenrui, et al. Evaluation on landslide-debris flow activity magnitude in the middle-South of Gansu province based on GIS [J]. Journal of Desert Research, 2005(6): 897-903.
- [15] 赵成, 施孝. 甘肃地质灾害发育特征及防治对策[J]. 甘肃科学, 2003(15): 23-29.
- ZHAO Cheng, SHI Xiao. Characteristics and prevention countermeasures of geological hazards in Gansu province [J]. Journal of Gansu Sciences, 2003(15): 23-29.
- [16] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006.
- [17] 张先发, 李明华, 张小刚, 等. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理, 1995, 8(3): 102-106.
- ZHANG Xianfa, LI Minghua, ZHANG Xiaogang, et al. The relationship between rainstorm and landslide in upper reaches of Yangtze River [J]. Journal of Geographical Sciences, 1995, 8(3): 102-106.
- [18] 李鸿琰, 曾思伟. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- LI Honglian, ZENG Siwei. Debris flow in Gansu province [M]. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [19] 冯军, 尚学军, 樊明, 等. 陇南地质灾害降雨区划及临界雨量研究[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 20-24.
- FENG Jun, SHANG Xuejun, FAN Ming, et al. Geological calamity distribution and critical rainfall in Longnan region of Gansu province [J]. Arid Meteorology, 2006, 24(4): 20-24.
- [20] 牛最荣, 扈祥来, 张正强. 甘肃省最大点雨量量级分布规律及其暴雨衰减指数分析[J]. 水文, 2004, 13(4): 21-25.
- NIU Zuirong, HU Xianglai, ZHANG Zhengqiang. Analysis of the maximum point rainfall distribution and rainstorm attenuation index in Gansu province [J]. hydro, 2004, 13(4): 21-25.
- [21] 牛最荣, 赵志农, 扈祥来, 等. 甘肃省时段暴雨量随高程变化规律分析[J]. 水文, 2005, 25(3): 46-49.
- NIU Zuirong, ZHAO Zhinong, HU Xianglai, et al. Analysis of rainstorm in Gansu province with elevation changes [J]. Hydro, 2005, 25(3): 46-49.