

文章编号: 1674-2184(2021)04-0125-06

# 四川省康定市泥石流灾害与降水预报阈值确定

王 敏, 王严琪, 孙树峻, 徐 瑗

(四川省甘孜藏族自治州气象局, 康定 626000)

**摘要:**通过对康定市历史泥石流灾害资料与历史气象降雨资料进行统计分析,揭示了康定市泥石流灾害与降雨的关系特征,并在此基础上,研制了康定市 1h、3h 降雨量诱发泥石流预警指标。结果表明:康定市境内各地均有发生泥石流灾害的可能性,东部地区是泥石流的高易发区。康定市境内泥石流灾害发生与当日降雨量、短时强降雨、前期有效降雨量关系密切。降雨量大且降雨强度强的月份(6~8月)易发生泥石流灾害。短时强降雨的强度越大,发生灾害的风险越大,强降雨出现频率最高的时段(19:00~02:00)也是泥石流高发时段。当降水强度<10mm/h 和 20mm/3h 时,有出现泥石流的可能性,泥石流灾害气象风险等级为 4~5 级;当降水强度达到 10~20mm/h、21~35mm/3h 时,发生泥石流的可能性较大,风险等级为 3 级;当降水强度达到 21~35mm/h、36~50mm/3h 时,泥石流发生的可能性大,风险等级为 2 级;当降水强度>35mm/h、50mm/3h 时,泥石流发生的可能性极大,风险等级为 1 级。

**关键词:**泥石流;特征;降水;预报;阈值

**中图分类号:** P426.616

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2184.2021.04.018

## 引言

康定市地处川西高原和四川盆地的过渡带,地形复杂,气候多样,年平均气温 3.5~7.1℃,年降水量 600~1000mm,4~9 月降水占全年降水量的 90%,降水空间分布不均,呈由东南向西北减少的趋势,其中东部地区在 800mm 以上<sup>[1]</sup>。由于特殊的地形地貌影响,强降雨的集中时段极易引发地质灾害。近年来,康定市境内泥石流灾害均造成不同程度的灾害,严重影响了人民群众的生产生活,制约着地区的社会、经济发展。2009 年 7 月 23 日康定鱼通镇发生泥石流,造成 16 人死亡,38 人失踪,省道 S211 线公路多处中断,直接经济损失约 8700 万元。2010 年 6 月 14 日康定捧塔乡发生泥石流,造成 23 人死亡,7 人受伤。因此,研究泥石流发生的原因并制订科学的预报预警机制在防灾减灾中具有重要意义。

相关研究<sup>[2-11]</sup>已在泥石流与降水的关系以及泥石流灾害预报等方面取得了一系列进展。薛建军等<sup>[2]</sup>对区域性地质灾害气象预报方法进行研究,从气象的角度,基于对全国地质灾害预警区域的划分,利用历史地质灾害记录以及历史气象资料,运用了日降水量、前期累计有效降水、连续降水天数作为预报因子,分区建立了全国范围的区域气象潜势预报模型,并从 2003 年 6 月 1 日开始投入业务应用,总体预报服务效

果较好,取得了较好的社会效益。白学文等<sup>[3]</sup>利用乡镇加密雨量站,对玉溪滑坡、泥石流与降水关系及气象预警预报做了研究,分析 2004~2006 年不同地质结构山体滑坡、泥石流与降水的关系,提出乡镇雨量点在气象地质灾害中三站平均雨量应用方法,重点分析了触发滑坡、泥石流的降水类型、降水强度和地质结构,得出不同地质结构和降水条件下的滑坡、泥石流等级预报指标,在结合降水预报和实况降水的基础上建立玉溪市山体滑坡气象预警预报等级。郁淑华等<sup>[4]</sup>通过对 1991~2001 年四川盆地发生泥石流、滑坡灾害的气象成因(强降雨)进行分析,得出了四川盆地不同的地质地貌条件下泥石流、滑坡预测雨量标准,建立了四川盆地泥石流、滑坡产生的强降雨预报方法。刘海知等<sup>[5]</sup>研究了四川省典型区域滑坡、泥石流与降水的关系,结果表明:四川省滑坡典型区域在川东地区,泥石流典型区域在阿坝州地区,15d 有效降水、3d 有效降水与降水气候特征间的关系密切,可分别作为典型区域滑坡、泥石流预报因子。谭万沛等<sup>[6]</sup>建立了四川省泥石流预报的区域临界雨量指标,并且研究了区域临界雨量指标确定的几种方法,结果表明:川西高原的临界雨量最小,临界日雨量为 25~35mm,临界小时雨量为 15~20mm。总的说来,研究结果大多指出了日降水量、前期降水量及小时降水量均与泥石流的发生关系密切。本研究拟在揭示康定市境内泥石

收稿日期:2021-06-18

资助项目:甘孜藏族自治州气象局科技创新开发课题(2021-3)

作者简介:王敏,高级工程师,主要从事天气预报预测服务工作。E-mail:438713038@qq.com

流活动和降水时空分布关系的基础上,探讨引起泥石流的降雨量预报因子和阈值确定,为康定市泥石流灾害的监测预警及防治提供理论指导。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

2000~2019年康定境内发生的泥石流灾害数据由州应急管理局提供。2000~2019年降雨量资料由康定国家气象站提供。所有泥石流发生点的降雨量取距离最近的气象站数据,如果该站数据有误或缺失,再按就近原则选其他站点雨量代替。所使用的区域自动气象站数据和单雨量站数据均经过严格质量控制。

### 1.2 研究方法

本文对泥石流个例和降雨量的对应关系进行统计分析。有效雨量计算方法使用经验公式计算,降雨量区间概率数计算采用回归分析法、最小二乘法等方法。研究将泥石流气象风险等级分为5级,分别确定出不同级别的雨量预报阈值。

## 2 康定市地质地貌概况

康定市境地处四川盆地西缘山地和青藏高原的过渡地带,地势由西向东倾斜。地跨 $29^{\circ}08''\sim 30^{\circ}46''N$ 、 $101^{\circ}02''\sim 102^{\circ}30''E$ ,辖区面积 $1.16\text{万 km}^2$ 。大雪山中段的海子山、折多山、贡嘎山由北向南纵贯县境,将其分为东西两大部分,西部和西北部为丘状高原及高山深谷区。东部为高山峡谷,多数山峰在 $5000\text{m}$ 以上,市境内海拔最高点为“天府第一峰”贡嘎山主峰,最低点在大渡河。大渡河流经境内,境内山高坡陡,河谷幽深,峰峦重叠,沟壑交错,地形起伏大,地势西高东低,新构造运动强烈,形成典型的高山峡谷地貌。河流两岸支沟发达,与大渡河成正交分布,在其交汇处多形成洪积扇或洪积锥地貌,河谷或沟谷均呈“V”型,谷缘到谷底相对高差较大,一般在 $2000\sim 3000\text{m}$ ,最高达到 $6500\text{m}$ 。新构造运动成为康定市泥石流松散固体物质补给来源最基本的因素<sup>[12-13]</sup>。加之人类开发活动频繁,境内共发育泥石流沟140余条,泥石流类型多样,并且汛期降水时段集中,泥石流灾害成为康定市最严重的地质灾害(图1)。

## 3 康定市泥石流灾害与降水的关系

泥石流的发生是一个由多种自然因素包括人为因素共同作用下的从缓慢变化到突变的复杂过程,但在一定的地质结构特征及环境条件下,降水(包括持续性降水和短时强降水)是泥石流的最主要的诱发因素<sup>[14]</sup>。降水增加了岩石的含水量,软化岩土体,引起地表土层被冲刷,发生水土流失,降低斜坡的稳定性,

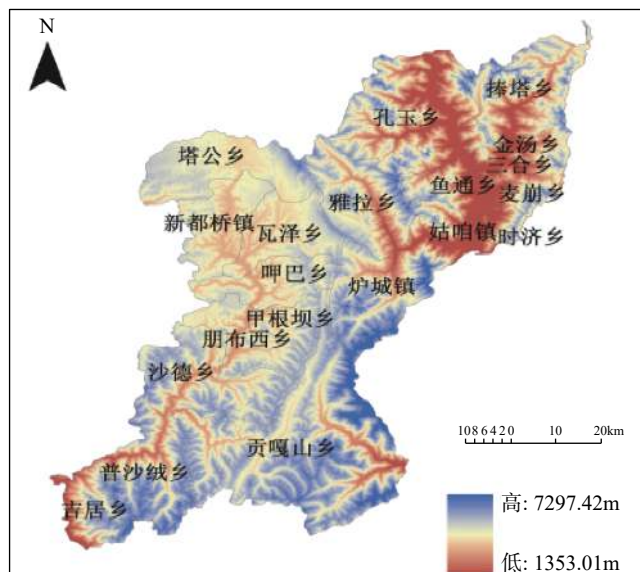


图1 康定市主要泥石流沟空间分布

从而造成了泥石流发生<sup>[15]</sup>。由于造成重大灾害损失的主要是中型泥石流及以上灾害,因此本文着重研究中型及以上泥石流灾害等级与降水的关系。经普查,2000~2019年康定市共发生52起造成灾害的中、大型泥石流,均因降雨因素引发,且多发生在地质灾害易发区。

### 3.1 康定市泥石流灾害与降水的空间关系

依据2000~2019年期间泥石流灾害资料,分别统计不同地域和24h内不同时段出现的泥石流灾害次数与其对应的降雨日数、降雨量及降雨强度。结果表明:康定市境内各地均有发生泥石流灾害的可能性;市区附近的炉城街道办、雅拉乡靠近城区地域占27.1%;鱼通镇、麦崩乡、姑咱镇、孔玉乡沿大渡河河谷地带占41.7%;捧塔乡、金汤镇的大部分地带占20.8%;沿营九线从松林口开始至贡嘎山镇境内色巫绒河等地的河谷地带和雅拉乡至炉城街道至老榆林的大渡河右岸等地的高山峡谷区占10.4%;康定市折多山东部地区特别是大渡河沿岸一带是泥石流极易高发区,折多山以西地区发生泥石流的概率相对较小。从相应的降雨量看,折多山东部地区平均降雨日数 $150\sim 173\text{d}$ ,平均降雨量 $630\sim 858\text{mm}$ ,整体多于折多山以西地区的 $131\sim 152\text{d}$ 和 $623\sim 783\text{mm}$ 。折多山东部地区(康定东部地区)最大小时降雨量为 $33.7\text{mm}$ ,最大日降雨量为 $65.4\text{mm}$ ;折多山西部地区(康定西部)最大小时降雨量为 $22.3\text{mm}$ ,最大日降雨量为 $50.6\text{mm}$ 。综合分析来看:降雨量大、降雨日数多、降雨强度大的折多山东部地区泥石流发生频率高于降雨量小、降雨日数少、降雨强度小的折多山西部地区。

### 3.2 康定市泥石流灾害与降水的时间关系

分析2000~2019年发生的52起泥石流灾害个例

可知:年降水量超过多年年平均量值的有8年;在发生较多(泥石流发生次数 $\geq 4$ 次)泥石流的年份,年降水量均较多年平均值偏多年份占57.1%;2017年偏多最多(16.0%),全年共发生五起泥石流灾害。可见泥石流的发生率与年降雨量有一定的关联性,即降雨强度较大的年份发生泥石流的概率亦较高,但这种规律不存在普遍性,泥石流的发生与单次暴雨强度和持续降雨过程的累计降雨量以及久旱转雨等因素的关系更为密切。

分析统计了泥石流发生次数所对应月份占比(图2):6月为34.6%,7月为28.9%,8月为21.2%,5月为9.6%,9月为3.8%、4月为1.9%。可见康定市泥石流灾害在4~9月均有可能发生,相对集中时段在6~8月。对应的历年平均降雨量:4月为63.3mm,5月为108.3mm,6月为173.5mm,7月为124.3mm,8月为119.0mm,9月为128.7mm,10月为52.5mm。在每年4~10月是康定降水集中的季节,6~9月总降雨量大,雨日多,但在6~8月短时降雨强度大,9月以连阴雨天气为主。可见,泥石流发生与总降雨量的大小和短时强降水的强度有密切关系,降雨量大且降雨强度强的月份易发生泥石流灾害。

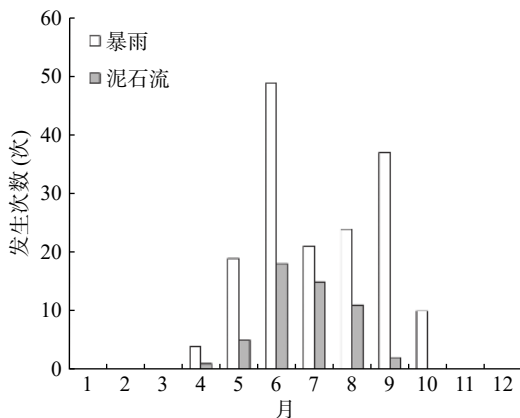


图2 2000~2019年康定市泥石流发生数与暴雨的逐月关系与作者确定是暴雨次数还是降雨次数?

### 3.3 泥石流发生时日最大短时强降水的变化

根据康定气象站提供的乡镇单雨量站和区域站降水数据,结合泥石流发生情况,分析降水强度、降水时间、前期累计降水量诱发泥石流的概率。其中,降水强度是指在一定时间内降水量的多少,通常是用1h、3h和1d的降水量来衡量。短时强降水是指短时间内降水强度较大,一般1h降水量超过20.0mm的天气现象<sup>[16]</sup>。短时强降水具有突发性强、来势猛、降水时间集中等特点,因此短时强降水常常会造成城镇内涝、山体滑坡等气象衍生灾害。但是在高原地区,由于地质结构各种因素的影响,小时降雨量 $< 20.0\text{mm}$ 时也可能引发泥石流灾害。统计康定市有短时强降水资料的泥石流共40次,有2次小时降水量 $> 20.0\text{mm}$ ,

占5.0%;有30次小时降水量15.0~20.0mm,占75.0%;6次小时降水量在10.0~14.9mm,占15.0%;2次小时降水量 $\leq 10.0\text{mm}$ ,占5.0%。从泥石流发生当日短时强降水发生的时间段(图3)来看,60.0%发生在19:00~02:00,30.0%发生在14:00~19:00,10%发生在02:00~08:00,08:00~14:00没有强降水发生的记录。由此可见,康定市强降水出现频率最高的时段与泥石流高发时段相吻合;短时强降水的雨强越大,发生灾害的风险越大;强降水出现频率最高的时段也是泥石流高发时段。

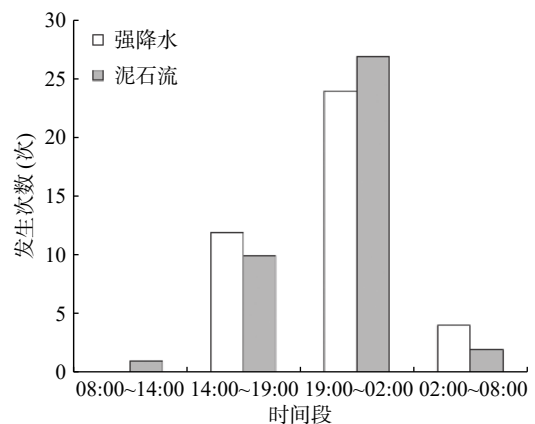


图3 2000~2019年康定市泥石流发生数与短时强降水发生时段的关系

## 4 康定市泥石流灾害降水预报因子阈值

### 4.1 方法

#### (1) 泥石流气象风险预警等级

泥石流气象风险等级共分为5个等级,而泥石流气象风险预警等级共分为4个等级,分别对应泥石流气象风险等级4级到1级,泥石流气象风险等级5级为泥石流风险较低,一般不发预警。

4级:蓝色预警,表示预警区内泥石流气象风险有一定风险。

3级:黄色预警,表示预警区内泥石流气象风险较高。

2级:橙色预警,表示预警区内泥石流气象风险高。

1级:红色预警,表示预警区内泥石流气象风险很高。

#### (2) 雨量阈值的确定

1h、3h雨量阈值用泥石流个例统计分析得出。

#### (3) 有效雨量的计算

本文在分析地质灾害与前期降雨的关系时,考虑灾害发生前7天和灾害发生当天的降雨量及累计雨量。根据石兴琼等<sup>[17]</sup>和沈毅等<sup>[18]</sup>的研究,有效雨量公式为:

$$R_n = \sum_{i=0}^n 0.8^i R_i \quad (1)$$

式中:  $R_n$  为灾害发生前  $n$  天有效雨量,  $R_i$  为灾害发生前第  $i$  天的雨量,  $0.8^i$  为第  $i$  天的雨量衰减系数, 灾害发生当天  $i=0$ , 灾害发生前一天  $i=1, \dots$ 。

#### 4.2 1h 和 3h 降雨量阈值

通过对康定市有小时降雨的资料个例统计, 1h 降雨量  $\geq 20\text{mm}$  有 2 个, 1h 降雨量 10~20mm 有 36 个, 1h 降雨量 5~10mm 有 53 个。分析对应发生的泥石流灾害可知: 1h 降雨量  $>20\text{mm}$  的均发生了泥石流; 1h 降雨量 10.0~20.0mm 的有 36 次发生泥石流; 1h 降雨量 5~10mm 的有 2 次发生泥石流。统计相应时段 3h 降雨量分别是  $>45.0\text{mm}/3\text{h}$ 、15~45mm/3h、10.0~14.9mm/3h。通过对比灾害当日降水量以及前 7 天降雨量资料, 并综合考虑泥石流发生地的地质状况等因素, 根据泥石流气象风险对应的五个等级, 综合确定出 1h 和 3h 降雨量预警阈值: 当降水强度  $<10\text{mm}/\text{h}$ 、 $20\text{mm}/3\text{h}$  时, 有出现泥石流的可能性, 泥石流灾害气象风险等级为 4~5 级; 当降水强度达到  $10\sim 20\text{mm}/\text{h}$ 、 $21\sim 35\text{mm}/3\text{h}$  时, 发生泥石流的可能性较大, 风险等级为 3 级; 当降水强度达到  $21\sim 35\text{mm}/\text{h}$ 、 $36\sim 50\text{mm}/3\text{h}$  时, 泥石流发生的可能性大, 风险等级为 2 级; 当降水强度  $>35\text{mm}/\text{h}$ 、 $50\text{mm}/3\text{h}$  时, 泥石流发生的可能性极大, 风险等级为 1 级。

#### 4.3 前期有效降雨量阈值

##### 4.3.1 降雨量总体分布特征

通过分析泥石流记录和泥石流发生前 0~7 天有效降雨量, 得出降雨量与泥石流的相互关系, 找出各时间尺度降雨量的分布区间, 总结出临界降雨量指标。确定各时间尺度降雨量与泥石流的相关程度(因子的重要性), 用于确定预警模型中各因子的权重, 提高泥石流气象风险预报模型的精度。

取 5mm 为一区间, 分别计算每一区间发生的泥石流数量占该区间历史降水量的比例, 即用不同量级降水的泥石流个数除以该量级降水出现的天数, 得到不同降雨量级下每天可能发生的泥石流个数(概率),

来确定泥石流风险等级。由于日降水量采用的国家站资料, 而与泥石流发生地区域站降水量有一定差别, 可能造成分母为 0, 分子不为 0 的情况, 故将分母为 0 的数据做无效处理。结果如表 1 所示, 泥石流当天雨量对泥石流敏感性最好, 发生泥石流当天平均雨量达到了 23.43mm; 其次是前 1 天和前 2 天平均雨量超过 10mm; 而前 6 天到前 7 天敏感性相对较差, 平均雨量分别为 6.77mm、5.85mm。从泥石流发生前的平均有效雨量来看, 诱发康定泥石流的强降雨主要发生在泥石流发生当天以及灾害发生前 2 天的累计降水, 第 3 天到第 7 天的平均降雨量变化不大。

##### 4.3.2 降雨量区间概率数的计算

用于泥石流灾害分析的雨量数据一般是当天及前几天(每天)的雨量记录, 有些地区也选用小时甚至分钟雨量来进行分析, 但是考虑到泥石流发生的特点以及本地的实际监测情况, 当天及前几天的雨量则成为最重要、最通用的分析数据。但是由于地表径流的产生、水分的蒸发等过程, 使得进入岩土体的雨量小于实际记录雨量, 即记录到的雨量特别是前期降雨不能全部对泥石流的发生产生影响。故本文采用前期有效降水量的概念<sup>[19]</sup>, 所谓“前期有效降水量”是指灾害发生前的降雨过程中对斜坡岩土体稳定性产生作用的雨量。国外学者对此已做过相应的研究, 并提出了计算进入岩土体雨量的经验公式<sup>[20]</sup>:

$$r_{a0} = kr_1 + k^2r_2 + \dots + k^n r_n \quad (2)$$

式中:  $r_{a0}$  为第 0 天的前期有效降水量,  $k$  为有效降水量系数 ( $k \leq 1$ ),  $r_n$  为前第  $n$  天的降水量。有效降水量系数  $k$  表示岩土体对雨水滞留能力的大小, 它由区域内岩土体总体性质决定, 一般取 0.65~0.85。尽管这一方法及  $k$  值是根据北美某地区的数据计算得到的, 但是在世界其他许多地方的检验效果都比较理想<sup>[21]</sup>, 本文取 0.8。将  $R_0\sim R_7$  的降雨量进行回归分析, 采用最小二乘法进行参数估计。 $R^2$  为回归平方和与总离差平方和的比值, 表示总离差平方和中可以由回归平方和解

表 1 康定市泥石流灾害发生时降雨量分布情况

	当天		前1天		前2天		前3天	
	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量
平均雨量(mm)	23.43	33.17	12.18	40.30	11.14	44.21	7.63	47.41
最小雨量(mm)	0.80	3.86	0.00	8.85	0.00	15.25	0.00	16.48
最大雨量(mm)	60.10	83.42	34.10	95.26	33.60	96.28	33.60	100.05
	前4天		前5天		前6天		前7天	
	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量
平均雨量(mm)	7.82	50.00	7.91	50.00	6.77	51.77	5.85	53.00
最小雨量(mm)	0.00	20.42	0.00	20.42	0.00	20.87	0.00	20.87
最大雨量(mm)	38.80	101.49	34.20	101.49	28.60	101.60	25.90	101.60

释的比。这一比例越大越好, 模型越精确, 回归效果越显著。 $R^2$  取值介于  $[0, 1]$ ,  $R^2$  越高, 越接近 1, 回归拟合效果越好, 一般认为超过 0.8 的模型拟合程度较高。其回归方程如下:

$$y_0 = 0.0081e^{0.0889x} \quad R^2 = 0.8308 \quad (3)$$

$$y_1 = 0.0022e^{0.1018x} \quad R^2 = 0.8626 \quad (4)$$

$$y_2 = 0.0003e^{0.1356x} \quad R^2 = 0.8197 \quad (5)$$

$$y_3 = 0.0001e^{0.1376x} \quad R^2 = 0.8498 \quad (6)$$

$$y_4 = 0.0001e^{0.1359x} \quad R^2 = 0.8742 \quad (7)$$

$$y_5 = 0.00003e^{0.149x} \quad R^2 = 0.7853 \quad (8)$$

$$y_6 = 0.0001e^{0.1274x} \quad R^2 = 0.8611 \quad (9)$$

$$y_7 = 0.0002e^{0.1144x} \quad R^2 = 0.8677 \quad (10)$$

式中:  $x$  分别为泥石流发生当天到前 7 天累计有效雨量,  $y$  为泥石流可能出现的概率。

经分析, 降水量与泥石流发生的概率呈正相关, 且呈指数函数增长态势, 故将降水量与发生地质灾害的概率用指数函数进行拟合(图 4)。

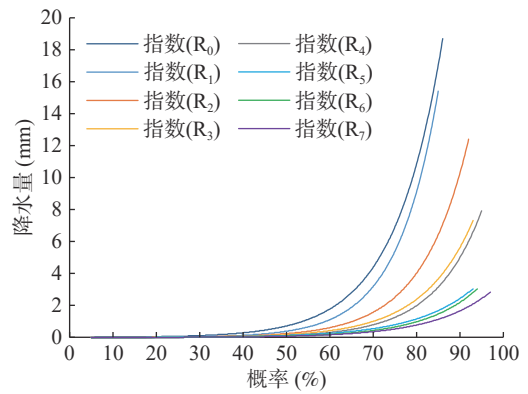


图 4 康定市降水量与泥石流发生概率的关系

### 4.3.3 泥石流气象风险等级前期有效雨量阈值

将泥石流频次  $y < 0.1$  定为发生泥石流风险较低, 5 级;  $0.1 \leq y < 0.4$  定为发生泥石流有一定风险, 4 级;  $0.4 \leq y < 0.7$  定为发生泥石流的风险较高, 3 级;  $0.7 \leq y < 1$  定为发生泥石流的风险高, 2 级;  $y \geq 1$  定为发生泥石流的风险较很高, 1 级。气象风险预警各等级雨量阈值见表 2(雨量四舍五入取整)。

表 2 康定市泥石流气象风险等级前期有效雨量阈值(单位:mm)

泥石流气象风险等级	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
五级	$\leq 36$	$\leq 44$	$\leq 48$	$\leq 55$	$\leq 56$	$\leq 59$	$\leq 60$	$\leq 61$
四级	36~44	44~51	48~53	55~60	56~61	59~64	60~65	61~66
三级	44~50	51~57	53~57	60~64	61~65	64~68	65~70	66~71
二级	50~54	57~60	57~60	64~67	65~68	68~70	70~72	71~74
一级	$\geq 54$	$\geq 60$	$\geq 60$	$\geq 67$	$\geq 68$	$\geq 70$	$\geq 72$	$\geq 74$

### 4.4 泥石流气象风险等级预警因子关系确定

综合考虑 1h 预报降雨量、3h 预报降雨量、当日降雨量、前期有效降雨量作为降雨量预报因子, 当其中一个因子预报等级为最高时, 直接赋予权重系数为 1, 其他因子权重系数为 0。

## 5 结论与讨论

本文通过对康定市历史泥石流灾害资料与历史气象降雨资料进行统计分析, 揭示了康定市泥石流灾害与降雨的关系特征, 并在此基础上, 研制了康定市 1h、3h 降雨量诱发泥石流预警指标, 主要结论如下:

(1) 康定市境内各地均有发生泥石流灾害的可能性, 东部是泥石流的高易发区; 17:00~02:00 是泥石流发生的高发时段。泥石流灾害发生与当日降雨量、短时强降雨、前期有效降雨量关系密切, 雨强越大, 发生灾害的风险越大。泥石流灾害对前 7 天及以下累计有效降水条件较为敏感, 前期有效累计雨量越大, 发生的风险越大。

(2) 当降水强度  $< 10\text{mm/h}$ 、 $20\text{mm}/3\text{h}$  时, 有出现泥石流的可能性, 泥石流灾害气象风险等级为 4-5 级; 当降水强度达到  $10\sim 20\text{mm/h}$ 、 $21\sim 35\text{mm}/3\text{h}$  时, 发生泥石流的可能性较大, 风险等级为 3 级; 当降水强度达到  $21\sim 35\text{mm/h}$ 、 $36\sim 50\text{mm}/3\text{h}$  时, 泥石流发生的可能性大, 风险等级为 2 级; 当降水强度  $> 35\text{mm/h}$ 、 $50\text{mm}/3\text{h}$  时, 泥石流发生的可能性极大, 风险等级为 1 级。

泥石流的气象风险预报是以降水预报为基础来进行的, 客观上要求降水预报更精细、更具体、更准确, 包括降水量、降水持续时间、降雨落区、1 小时降水强度、出现时刻等。相信随着预报技术的不断发展和在对泥石流形成机理的进一步认识基础上, 泥石流预报将会有长足的发展, 预报结果将会更加接近实际。从康定市的实际情况看, 泥石流发生的次数比本文收集到的样本要多, 尤其是较小型的没有形成明显灾情的样本没有进行收录分析, 还有下垫面水汽蒸发、近年来环境和植被的变化等许多因素没有进行考虑, 该项研究还需继续深入。

## 参考文献

- [1] 王俊骅, 唐沛. 雅安地区降雨时空变化特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 54-58
- [2] 薛建军, 徐晶, 张芳华, 等. 区域性地质灾害气象预报方法研究[J]. 气象, 2005, 31(10): 24-27
- [3] 白学文, 段旭, 解福燕, 等. 玉溪滑坡泥石流与降水关系及气象预警预报研究[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(4): 21-26
- [4] 郁淑华, 何光碧, 徐会明, 等. 泥石流滑坡发生的降水预报方法与雨量标准—以四川省盆地区域为例[J]. 山地学报, 2005, 23(2): 158-164
- [5] 刘海知, 马振峰, 范广洲, 等. 四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 73-77
- [6] 谭万沛, 韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. 灾害学, 1992, 7(2): 37-42
- [7] 陶云, 唐川, 段旭, 等. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 180-186
- [8] 熊木齐, 孟兴民, 庆丰, 等. 甘肃省陇南市白龙江流域泥石流灾害事件与降水特征的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 295-300
- [9] 晋玉田. 攀西地区泥石流滑坡灾害与降水关系的分析和预报[J]. 四川气象, 1999, 9(3): 34-38
- [10] 单九生, 刘修奋, 魏丽, 等. 诱发江西滑坡的降水特征分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 13-15
- [11] 丁桂伶, 王翊虹, 冒建, 等. 北京市泥石流易发区降雨预警阈值研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 136-142
- [12] 四川省康定市市志编撰委员会. 康定县志[M]. 成都: 四川辞书出版社, 1995
- [13] 甘孜州年鉴编纂委员会. 甘孜州年鉴(2011)[M]. 北京: 方志出版社, 2012
- [14] 钟燕川, 郭海燕, 徐金霞, 等. 四川省泥石流活动与降水因子特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 390-396
- [15] 乔建平. 降雨型滑坡泥石流灾害预警原理及系统结构[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 50-55
- [16] 马力, 冯汉中, 杨进, 等. 四川天气预报手册[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013
- [17] 石兴琼, 肖天贵, 房玉洁, 等. 西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 63-67
- [18] 沈毅, 露丹. 泸定县泥石流灾害特征及降水因子分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 81-85, 90
- [19] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2808-2812
- [20] Bruce J P, Clark R H. Introduction to Hydrometeorology[M]. London, Pergamon Press, 1966: 252-270
- [21] Thomas G, Michael C, Peter S. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model” [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157: 1059-1079

## Debris Flow Disasters and Precipitation Forecast Threshold Determination in Kangding City

WANG Min, WANG Yanqi, SUN Shujun, XU Yuan

(Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Kangding 626000, China)

**Abstract:** Based on the statistical analysis of historical debris flow disaster data and historical meteorological rainfall data in Kangding City, the relationship between debris flow disaster and rainfall in Kangding City was revealed. On the basis, the early warning indexes of debris flow induced by 1-hour and 3-hour rainfall in Kangding City were developed. The possibility of debris flow disaster occurs in all parts of Kangding City, and the eastern region is highly prone to debris flow. The occurrence of debris flow disaster in Kangding City is closely related to daily rainfall, short-term heavy rainfall and early effective rainfall. Debris flow is prone to occur in months with heavy rainfall and strong rainfall intensity (June to August). The greater the intensity of short-term heavy rainfall is, the greater the risk of disasters is. The period with the highest frequency of heavy precipitation (19:00~02:00) is also the period with high occurrence of debris flow. When the precipitation intensity is less than 10mm/h and 20mm/h, debris flow is possible, and the meteorological risk level of debris flow disaster is 4~5. When the precipitation intensity is 10~20mm/h and 21~35mm/3h, debris flow is more likely to occur, and the meteorological risk level of debris flow disaster is level 3. When the precipitation intensity is 21~35mm/h and 36~50mm/3h, debris flow is more likely to occur, and the meteorological risk level of debris flow disaster is level 2. When the precipitation intensity is greater than 35mm/h and 50mm/3h, debris flow is very likely to occur, and the meteorological risk level of debris flow disaster is level 1.

**Key words:** Debris flow, Characteristic, Precipitation, Forecast, Threshold value