文章编号:2096-5389(2020)06-0018-07

遵义地区降水型滑坡和泥石流前兆强信号研究

李丽丽^{1,2},廖留峰^{2,3},陈百炼^{1,2},杨富燕^{1,2},陈 芳^{1,2}

(1.贵州省山地环境气候研究所,贵州 贵阳 550002;2.贵州省山地气候与资源重点实验室,贵州 贵阳 550002;3.贵州省生态气象和卫星遥感中心,贵州 贵阳 550002)

摘 要:该文针对贵州省 68 个土壤湿度站和降水资料做相关性分析,结果表明土壤湿度与降水的相关性体现在集中降水的同步对应关系和持续性降水的滞后相关关系上,土壤湿度与前期降水的正相关关系随前期降水日数的累积而增加,且在 4~6 d 左右达到稳定。基于遵义地区 28 例降水型滑坡泥石流灾害个例,分型讨论了土壤湿度增量的垂直分布和水平分布特征,说明在引入模型时应该主要考虑表层(10~20 cm)的土壤湿度的变量累计,根据降水类型的不同需要分型讨论变量引入 模型的统计时段。在以上研究基础上,建立了能够同时反映降水和土壤湿度中短期变化特征的降水型滑坡泥石流前兆"强信号"指标模型。模型分集中降水型和分散降水型两种情况,并包括降水变量和土壤湿度变量两项,分散型模型的统计时段为灾害日前两日内,集中型模型的统计时段为灾害日前6日内,权重系数是根据研究地区的降水类型、土壤类型和田间持水量等相关因素的配置综合考虑和调整后确定的经验系数。对遵义地区 23 个个例建立模型并检验的结果较好。

关键词:降水型滑坡泥石流;前兆强信号;土壤湿度

中图分类号:P426.615 文献标识码:A

A Study on Previous Stronger Signal Model of Landslide – debris Flows Caused by Precipitation in Zunyi Region

LI Lili^{1,2}, LIAO Liufeng^{2,3}, CHEN Bailian^{1,2}, YANG Fuyan^{1,2}, CHEN Fang^{1,2}

(1. Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China; 2. Guizhou Key Lab of Mountainous Climate and Resources, Guiyang 550002, China; 3. Guizhou Ecological Meteorological and Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: In this paper, 68 soil moisture stations and precipitation data in Guizhou province were analyzed, the results show that the soil moisture was closely related to rainfall, reflecting the synchronous correlation of concentration rain type and the lag correlation of persistent rain type; as the day of accumulative rain days increased, the former positively correlation is better, and a plateau is reached when the rain days accumulated to $4 \sim 6$ days; Based the twenty – eight landslide – debris flows cases caused by precipitation of Zunyi region, the variable temporal and spatial characteristics of the soil moisture shows that, the moisture in the surface of soil layer $(10 \sim 20 \text{ cm})$ is important to the previous stronger signal model, the statistical time range should be different under the landslide – debris flows caused by different types of rain. Previous stronger signal model of landslide – debris flows caused by precipitation under different types of rain is built, which can reflect the short – middle anomaly characteristics of rainfall and soil moisture, including the variable of rainfall and soil moisture, the statistical time range of concentration rain type is the growth of former two days rain and soil moisture, and that of the persistent rain type is six days, the weight coefficient is determined by the regional influences, including rain type, soil type, field capacity and so on. The model was established for 23 individual cases in Zunyi area and the test results were good.

收稿日期:2019-10-13

第一作者简介:李丽丽(1988—),女,工程师,主要从事灾害性天气及雷达应用研究,E-mail:549346746@qq.com。

资助项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2017]2593):应用 GPS 技术提取贵州强降雨预报因子。

Key words: landslide - debris flows caused by precipitation; previous stronger signal; soil moisture

0 引言

滑坡、泥石流是我国汛期多发的地质灾害,每 年都给人民生命财产造成巨大损失。滑坡泥石流 发生在特定的地质环境条件下,一般都是由强降水 所触发或导致的。滑坡、泥石流灾害发生的机制研 究涉及到气象、水文、地质、生态等多个学科,因不 同地区灾害的影响因素复杂多变^[1-4],目前尚没有 比较通用的预报指标。气象上对滑坡泥石流灾害 的预警预报方法的研究主要是从前期降水与灾害 发生关系出发,分析灾害发生前期的降水时空分布 特征,结合地质环境条件找出诱发滑坡泥石流的降 水量及降水强度阈值并建立判别函数,从而对灾害 发生的可能性进行判断或概率预报^[5-8]。

贵州省的喀斯特地形地貌发育强烈,山高谷 深、地形破碎,遵义市位于云贵高原东北部,地势自 西北向东南逐渐降低,山地面积占总面积的65%, 以溶蚀和岩溶地貌分布最广,占全区域的75%以 上。在喀斯特地形地貌条件下,局地强降水产生的 巨大冲刷力和地表径流量造成地质条件脆弱和土 层较松软的地区泥石流灾害频发,每年汛期暴雨引 发的泥石流灾害较为突出。由于水文地质资料的 缺乏,以往的研究主要局限于对灾害发生前期降水 过程特征的分析,而几乎没有考虑土壤湿度变化过 程中所携带的信息。当土壤含水量增加时,一方面 会减小土层内部粘连性,破坏土层内部结构的稳定 状态;另一方面会增加土层的重量,使土层的动力 稳定性降低,而表面径流的不均衡分布也会破坏局 部的质量平衡,从而使局部地区土体失稳造成滑坡 泥石流灾害,因此滑坡泥石流灾害的发生与前期降 水对地表土层的侵蚀程度和土壤湿度状况有密切 关系。有研究表明,土壤湿度短期异常通过与大气 的相互作用会导致区域短期气候温度和降水变 化[9-12],这样的气候异常能够持续1-2月,并通过 波列的形式传播到下游地区^[13]。由于土壤湿度的 变化能够综合反应地表水文过程中的大量信息,结 合滑坡泥石流发生前期降水过程特征分析,可以尝 试从中提取泥石流发生的前兆强信号指标。

长期以来可利用的土壤湿度观测资料较少,土 壤湿度资料大多是通过遥感反演或常规资料计算 得到^[14-17],贵州地区由于全年相对云量较多、云层 较厚,且下垫面复杂,反演产品难以满足应用研究 的需要。随着我国气象现代化的步伐推进,贵州省 自 2010 年陆续建立了 118 个土壤湿度自动观测站, 已获取了大量连续的自动观测资料,使资料可用性 大幅提高。本次研究综合利用土壤湿度自动观测 站资料和同期的降水资料,以贵州遵义地区近年来 发生的滑坡泥石流灾害为例,分析建立灾害前兆强 信号指标模型,为降水引起的地质灾害预报预警工 作探索一条新思路。

1 资料和方法

首先选取贵州省内 68 个土壤湿度站点,2011— 2015 年期间的土壤水分站点资料,10~100 cm 深度 共 8 层的土壤湿度资料与同期逐时次区域自动站观 测的降水资料做分析,分析降水过程前期土壤湿度 和降水量的相关关系,土壤湿度站点和区域站点多 为同一地点,如果有不同则选取就近 5 km 内的区域 站参考。

由于持续型降水和短时强降水造成的滑坡和 泥石流灾害的物理过程区别较大,持续型降水的侵 蚀作用占主要贡献,短时强降水的冲刷作用占主要 贡献,因此在确定前兆信号指标参数时需要分型考 虑。分型的依据是:统计距离滑坡泥石流灾害点最 近的自动站观测资料,在灾害发生前14 d 内有至少 一次中到大雨降水过程的情况为集中型,若仅有小 于中雨级别降水过程的情况为分散型。并以此为 标准,将灾害个例分为集中型和分散型两种情况, 分别考虑引入土壤湿度的深度层和降水量累积日 数等参数。

本文中涉及到的两个特殊的统计量:有效降水 量和土壤含水量增量。若降水发生前 k 天的降水量 为 R_k,则降水日 t 天内的有效降水量为 F(t):

$$F(t) = \sum_{k=1}^{t} (R_k \cdot 0.8^k)$$

k为衰减系数,提前于灾害当日越早的降水日 对应的衰减系数越大,对有效降水量的贡献越小。 土壤含水量增量是指对应的观测深度的土壤体积 含水量7d内逐时距平值的正距平累计量。

在提取滑坡泥石流的前兆性强信号指标的研究过程中,是以遵义地区选取的个例为研究对象。 遵义地区共有17个土壤自动观测站点,其中12个 站点可用资料最早从2010年5月1日开始,5个站 点为中国华云气象科技集团公司生产的自动土壤 水分观测仪,可用资料最早从2012年5月1日开 始。通过对贵州省遵义市2010—2014年期间发生 的滑坡泥石流灾害调查报告做筛选,提取其中灾害 发生前14 d内有中到大雨过程的灾害共28 例,其 中包括50 处灾害点。

2 不同深度层的土壤湿度与降水量的 相关分析

降水过程引起地面土壤湿度增加是不言而喻 的,但是不同深度的土壤湿度与降水量的相关关系 并不是简单的线性关系,一次降水过程产生的降水 量能够持续影响土壤湿度变化的时间有多久?土 壤湿度的变化量与前期不同的累计时间段降水的 相关性如何?这都是利用土壤湿度和降水量建立 降水型滑坡泥石流前兆强信号指标的依据。

为探究这个问题,研究特选取贵州省内共68个 土壤湿度站点,以最近的降水观测站点与之对应, 计算相关系数,剔除无降水时段的土壤湿度与降水 序列的相关性随着土层的深度由浅入深,通过显著 性检验的站数所占比例线性变少,10 cm 层有超过 80%的站点显著正相关,30 cm 深度也有超过 60% 的站点通过了 99%的置信度检验。为了找出不同 时间长度的前期降水累积量与土壤湿度相关性最 好的累积天数,统计全省 68 站从短期到中期不同累 积时间段(1~15 d)的前期降水量与土壤湿度的相 关系数,其中至少通过 99% 置信度检验的站点比 例,如图 1b 所示。10~50 cm 在 1~4 d 的累积前期 降水与土壤的相关系数通过检验的百分数随累积 的时间变长而快速升高,4~6 d 以后一直到 15 d 逐 渐达到稳定,随着累积的天数增长百分比变化不 大。综上,在引入指标时应该主要考虑表层 10~ 20 cm的土壤湿度的变量,降水量的累积时段关注 4 ~6 d 左右的变化情况对降水型灾害的指示意义。





Fig. 1 The correlation between each layer soil moisture and precipitation during the rainfall period(a); the correlation between each layer soil moisture and the precipitation with different accumulated days(b)

3 两种降水型滑坡泥石流的土壤湿度 分布特征

由于持续型降水的侵蚀作用占主要贡献,短时 强降水的冲刷作用占主要贡献,因此在基于灾害个 例做讨论确定前兆信号指标参数时需要分型考虑。 通过对贵州省遵义地区 2010—2014 年期间发生的 滑坡泥石流灾害调查报告做筛选,提取其中灾害发 生前 14 d内有中到大雨过程的灾害共 28 例,其中 包括 50 处灾害点。根据 28 例滑坡泥石流的降水型 分类,集中型共有 11 例,80% 以上的降水量都集中 在灾害发生当日至提前 2 d 的 3 d 内;分散型共有 12 例,80% 以上的降水量都相对均匀的分布在灾害 发生当日至提前 6 d 的 7 d 内,其余 5 个个例的降水 量分布不具有典型性。将两种类型的降水分别统 计得到平均的分布型作为说明此种类型特点的典型特征曲线,如图2:



图 2 两类降水型个例灾害发生前逐日降水分布的平均状态

Fig. 2 The average of each former daily precipitation in two landslide – debris flows types classified according to precipitation

集中型的12个个例从灾害发生当日至提前6d 累积的总降水量平均为175.0mm,且降水量主要集 中在灾害发生当日和前两日,分散型对应的值为 62.5mm,较为均匀的分布在灾害发生当日和之前 的6d内,说明集中型多为强降水过程,分散型多为 持续多日的小到中雨降水过程,接下来需要分别讨 论两类降水型土壤湿度增量的垂直结构。

3.1 不同降水类型条件下土壤湿度增量的垂直结 构特征

由于土壤湿度的变化过程较为缓慢,为了集中 体现研究时段内的土壤湿度在不同降水类型条件 下的垂直结构特征,特定义统计量—土壤含水量增 量,即对应观测深度的土壤体积含水量7d内逐时 距平值的正距平累计。集中型降水和分散型降水 个例的土壤湿度增量在垂直结构上均呈现指数型 的分布,如图3。10~20 cm 深度的土壤湿度状况的 异常增大在滑坡灾害中体现的最为明显,集中型降 水个例分布的这一点特征较分散型降水个例分布 更为明显。通过已有的研究表明,贵州主要是喀斯 特地貌,溶蚀和岩溶地貌分布广泛,土层较薄,保水 蓄水能力差,水分向下渗透流失速度快,因此前兆 信号指标在引入土壤湿度变量时主要考虑浅层的 变化。





3.2 不同降水类型条件下土壤湿度的水平分布特征

如图 4,从灾害点和河流位置叠加图上来看,灾 害集中的易发区大致有 6 个(分别编号 A ~ F),大 多分布在河流附近地区。A 区为习水县境内的习水 河流域及习水县东部地区;B 区主要为正安县境内 的清溪河流域;C 区为桐梓县境内的桐梓河流域;D 区为湄潭县城范围的湄江流域;E 区为余庆县和凤 冈县境内的乌江流域;F 区为赤水县和习水县境内 的赤水河流域。其中 A、B、C、D 区的易发区内都有 土壤站点分布,E、F 区土壤站点与易发区的灾害点 位置稍远,由于土壤水分站资料存在代表性问题, 因此选取 4 个发生灾害点位置位于土壤站点附近的 滑坡泥石流个例。



landslide - debris flows cases(brown circles)
and disaster frequent regions(red dotted lines)

根据4次个例7d内有效降水量和10 cm 层土 壤体积含水量增量的空间分布对比如图5可见,降 水型滑坡灾害发生的位置基本上都位于有效降水 量较大的范围内,附近土壤站的增量也为正值且为 区域内的高值中心,因此有效降水量和10 cm层土壤 体积含水量增量能够作为灾害前兆指标的构成 因子。

Tab. 1 Base situation of four disaster cases							
序号	发生时间	发生区域	灾害类型	最大降水量/mm			
例1	2014 年 8 月 11 日	A	洪水、滑坡、泥石流	268.0			
例 2	2011年6月18—20日	D	滑坡	95.7			
例 3	2010年7月10日	В	滑坡	130. 2			
例 4	2014年6月4日	$A \ C$	洪水、滑坡、泥石流	100.0			

表1 4次灾害个例基本情况





Fig. 5 The distribution of precipitation accumulated seven days and the increment of 10cm soil volumetric moisture content in four cases(hazard points are marked by red triangles, a is the case1, b is the case2, c is the case3, d is the case4)

4 前兆"强信号"指标模型

4.1 构建模型

土壤体积含水量是一个反映土壤湿度特性的物理量,蒸发和渗透作用的强度变化是导致土壤湿度改变的主要因素,在没有降水的时段,土壤体积含水量受蒸发量、太阳辐射和风速等多种因素的影响变化,为了更好的反映土壤变化的异常增长,需要对资料做质量控制,尽可能减少仪器系统误差和维护造成的奇异变率。研究所考虑的是降水引起的滑坡灾害,由以上的研究结论可知,降水型滑坡泥石流灾害的降水类型主要分为集中型和分散型两种。

将集中型和分散型个例的土壤体积含水量增量(10~20 cm 层)和有效降水量在灾害发生前10 d和发生后5 d,共16 d的平均量绘图,集中型的个例以发生之日至提前6 d内的有效降水量和土壤体积含水量增量作为统计样本,分散型的个例以发生之日至提前2 d 作为统计样本。

如图 6,集中型灾害个例发生时段有效降水量 和土壤体积含水量增量处于高值时段,3 d 有效降 水量达到 150 mm,土壤体积含水量的增量平均达到 3 g/cm³ 以上;分散型个例的平均特点为:7 d 有效 降水量在灾害发生前 7 d 左右累积迅速,到发生前 3 d左右达到高值并维持 3 ~4 d,直至灾害发生后才 降低,土壤体积含水量 7 d 内增量随着有效降水量 的累积而累积,在灾害发生前一直维持正值。两个 量对于降水型滑坡泥石流灾害具有一定的指示意 义,可作为构建预警指标的要素。

因此在建立预警指标时也分为两种情况,F₁为 分散型指标,F₂为集中型指标:

 $F_{1}(t) = a_{1} \times (SW_{t} - SW_{(t-6)})/b_{1} + \sum_{k=0}^{6} (R_{(t-k)} \times 0.8^{k})/b_{2}$ $F_{2}(t) = a_{2} \times (SW_{t} - SW_{(t-2)})/b_{1} + \sum_{k=0}^{2} (SW_{t} - SW_{(t-2)})/b_{1} + \sum_{k=0}^{2} (SW_{t} - SW_{(t-2)})/b_{2}$

 $(R_{(t-k)} \times 0.8^{k})/b_{2}$

 SW_t 为t日10~20 cm 土壤体积含水量,单位为 g/cm³; R_t 为t日降水量,单位为 mm。公式由两部



图 6 灾害发生前后的有效降水量和土壤湿度增量的变化情况(a. 集中型降水个例,b. 分散型降水个例) Fig. 6 The variation of effective precipitation and the increment of soil moisture before and after the disaster(a. concentration rain type; b. persistent rain type)

分组成,第1部分为土壤体积含水量的变量,第2部 分为有效降水量,由于两个指数的量级相差较大, 因此引入权重系数 $a_1 \ a_2$ 将两个部分结合起来, b_1 和 b_2 的单位分别为 cm³/g 和1 cm,作用是将 F_1 和 F_2 转化为无量纲量。

每个站点的权重系数应根据具体情况体现差 异性,取值影响因素包括降水类型、土壤类型、田间 持水量以及海拔高度等因素。在降水类型的因素上, 分散型降水的模型中土壤湿度权重应加大,集中型 降水的模型中降水冲刷力的贡献率更高;土壤类型 方面,砂土的透水性最好,保水性最差,壤土的渗水 性和保水能力处于中间程度,黏土的渗水速度慢, 保水性好,因此3种土壤类型对权重系数的影响应 依次为(负一中性一正);田间持水量越高说明土壤 保水能力越好,因此权重系数应为考虑多个因素的 经验系数。

		- 1 1	MIXE	EVEN	10 70/11/11/13	2/1	110		
ıb. 2	The influencing	factors	list of	weight	coefficient	in	the four	typical	cases

4 个个例权重 5 数 的 影 响 因 表 列 表

序号	降水类型	土壤类型	海拔/m	土壤容重/(g/ cm ³)	田间持水量/%	а
例1	集中型	黄壤土(5 层)	1 438	1.2	31.6	0.15
例 2	分散型	粘壤土(10 cm、20 cm)黏土(30~50 cm)	792	1.03	32.4	0.5
例 3	集中型	壤土(5层)	630	1.4	29.4	0.1
例4	分散型	黄壤土(5 层)	1 438	1.2	31.6	0.4

注:土壤容重和田间持水量均取 20 cm 以上土层的平均值。

4.2 模型检验

为了检验指标的可用性,计算得到4个个例对 应的F指标的时间变化,如图7,其中个例1和个例 3的降水类型为集中型,个例2和个例4的降水类 型为分散型,F指标在灾害发生期均为峰值时段,检 验效果较好。

在23个典型个例的检验中,集中型降水的11 个个例中只有一个个例的F指标不在最大值时内, 但在最大值之后的极值点上,分散型降水型滑坡泥 石流个例则呈现两种特点,一种为灾害时段出现在 F指标在最大值附近,一种为灾害时段出现在F指 标最大值之后回落的时段,体现出土壤渗透作用的 滞后性特征。由于权重系数影响因素复杂,因此在 这方面还需要深入的研究。

5 结论

通过对土壤湿度和降水资料的综合分析,考虑 到降水型滑坡泥石流发生的基本原理和大量的统 计特征,建立了能够反映土壤湿度状况和降水中短 期特征的前兆强信号模型。得出如下结论:站点土 壤湿度与降水的相关性体现在集中降水的同步对 应关系和持续性降水的滞后相关关系上;土壤湿度 与前期降水的关系随前期降水日数累积正相关性 增加,在4~5 d 左右达到稳定;降水引起的滑坡泥 石流灾害需要分类型讨论,集中型降水考虑发生灾 害当日至前 2 d 的有效降水和土壤湿度增量的变





化,分散型降水需考虑发生灾害当日至前6d的时 段内两要素的变化,且权重系数 a 具有明显地区 差异。

本次研究的结果仅为对遵义地区 2010—2015 年降水引起的滑坡泥石流灾害基础上做的前兆信 号指标模型的研究,权重系数也需要根据研究地区 的具体情况不断的做修正,因此前兆强信号的代表 性和准确性还需不断的验证和调整。

参考文献

- [1] 张国平,许凤雯,赵琳娜.中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010,36(2):81-86.
- [2] 张洪江,郑国强,程金花,等.不同面积小流域山洪泥石流预报模型研究一以北京市密云县为例[J].灾害学,2011,26(1):65-69.

- [3] 王治华,郭兆成,杜明亮,等.基于数字滑坡技术的暴雨滑坡、泥 石流预警、监测模型研究[J].地学前缘,2011,18(5):303-309.
- [4] 康志成,李焯芬,马霭乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学 出版社,2004.
- [5] 张国平. 有效降水量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 2014,40(7):886-890.
- [6] 陈习伦,岑道文,黄自豪.望谟县2011年6月6日山洪地质灾害 影响评估[J].贵州气象,2014,38(3):62-64.
- [7] 李忠燕,田其博,张东海.石阡县降雨型滑坡临界雨量的研究 [J].贵州气象,2017,41(5):33-38.
- [8] 于淑华,何光碧,徐汇明,等. 泥石流滑坡发生的降水预报方法与 雨量标准[J]. 山地学报,2005,23(2):158-164.
- [9] 李巧萍,丁一汇,董文杰.土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟实验[J].应用气象学报,2007,18(1):1-11.
- [10]张文君,周天军,智海.土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验 [J].气象学报,2012,70(1):78-90.
- [11]张海宏,肖宏斌,祁栋林,等.青藏高原湿地土壤冻结、融化期间的陆面过程特征[J]. 气象学报,2017,75(3):481-491.
- [12]曹富强,丹利,马柱国.中国农田下垫面变化对气候影响的模拟 研究[J]. 气象学报, 2015,73(1):128-141.
- [13]安济民,王举,黄泓,等.中国不同区域土壤湿度与降水相互作用的研究[C]//中国气象学会.中国气象学会第31届年会论文集 S5 干旱灾害风险评估与防控,2014:474-481.
- [14] Karl T R. Some spatial characteristics of drought duration in the United States[J]. Climat Appl Meteor, 1983, 22:1356 - 1366.
- [15]Lee T J, Pielke P A. Estimating the soil surface specific humidity [J]. J Appl Meteor, 1992, 31:480 - 484.
- [16]马柱国,魏和林,符淙斌.土壤湿度与气候变化关系的研究进展 与展望[J].地球科学进展,1999,14(3):299-305.
- [17]马柱国,符淙斌,谢力,等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的 某些问题[J]. 地球科学进展,2001,16(4):563-568.