

李忠燕,田其博,左晋,等.贵州省降雨型滑坡预报模型及检验[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):47-53.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



贵州省降雨型滑坡预报模型及检验

李忠燕^{1,2},田其博³,左晋⁴,罗阳欢^{1,2},曹蔚^{1,2}

(1.贵州省气候中心,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.贵州省地质环境监测院,贵州 贵阳 550004;4.贵州省山地环境气候研究所,贵州 贵阳 550002)

摘要:根据贵州省2010—2017年630次降雨型滑坡资料以及国家气象台站和区域自动气象站逐小时降水资料,分析了贵州省降雨型滑坡的时空分布特征。基于5个不同时效降水指标与滑坡累积发生概率的拟合曲线公式,得到不同概率对应的5个降水指标的降水阈值,建立贵州省降雨型滑坡预报模型,并利用2018年新增滑坡样本对预报模型进行检验。结果表明:贵州省降雨型滑坡高发期主要集中在5—7月,其中6月发生概率最高,约48.6%;7月次之,约34.9%。当 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 、 R_{3d} 分别 ≥ 26.9 、 48.9 、 62.9 、 79.5 、 92.0 mm时,发布滑坡预报预警。在降雨型滑坡预报模型中,随着5个不同时效指标的降水量增大,降雨型滑坡累积发生概率变化呈现前后增加缓慢、中间快速增加的变化特征。模型检验结果表明,贵州省降雨型滑坡预报模型有一定的准确性,且5个降水指标均具有一定的实用性,其中利用 R_{3d} 开展降雨型滑坡预报准确率最好。

关键词:降雨型滑坡;概率;不同时效;预报模型**中图分类号:** P642.22**文献标识码:** A**文章编号:** 1002-0799(2022)03-0047-07

滑坡已成为仅次于地震灾害的第二大自然灾害,每年都会造成不同程度的人员伤亡和财产损失^[1]。造成滑坡灾害的原因除了内在环境因素外,还包括地震、人类活动以及降水等外在诱发因素。在我国,由于地质和气候等因素的影响,滑坡的易发区和多发区主要分布在太行山至秦岭以及西南地区,其滑坡发生频率较大^[2]。

贵州省地处云贵高原东侧斜坡地带(103°36'~109°35' E, 24°37'~29°13' N),境内地势西高东低,地貌以山地和丘陵为主,是国内唯一没有平原的省份,大部地区山岭纵横,河谷冲沟密布且较陡峭。贵州省气候属亚热带湿润季风气候,年平均降水量为1 179.6 mm,在汛期多以暴雨形式出现,降水强度大且历时短,导致水势易暴涨暴落,易诱发地质灾害。

收稿日期: 2021-07-28; **修回日期:** 2021-10-11**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFC1507201);国家自然科学基金项目(41865005)**作者简介:** 李忠燕(1986—),女,高级工程师,主要从事气候与气候变化工作。E-mail: 523257762@qq.com

2018年底贵州省已查明的地质灾害隐患点12 231处,全省88个县均受到过不同程度的地质灾害,且部分县城城区直接建设在滑坡体上,极易受到滑坡的威胁,因此有必要建立贵州省滑坡预报模型。为减少滑坡地质灾害,如何精准地对滑坡灾害进行预报是当下急需解决的问题,而确定滑坡致灾临界雨量阈值既是滑坡预报中的关键,亦是常见手段。目前确定滑坡致灾临界雨量阈值的方法主要有两种:一是基于滑坡灾害形成的动力物理模型来计算致灾阈值^[3-5]。由于动力物理模型机理复杂,且相关资料收集难度大,适用于小流域或小范围研究,应用范围较小。二是统计分析法。主要是基于滑坡灾情资料以及对应的降水资料,建立经验物理预测模型确定其滑坡致灾阈值^[6-12]。由于其不需物理理论推导,且相关资料资料易收集,因此该方法应用范围较广。研究表明,降水是诱发滑坡的重要因素之一^[13-15],主要是因为降水降低了土壤自身的物理性能并改变斜坡稳定性,触发滑坡发生,降水强度和历时长短等在一定程度上影响滑坡的形成^[1, 10, 13, 16-18]。鉴于降水是滑

坡的高触发因子,前人基于降雨强度(I)与持续时间(D)建立的降雨阈值指标^[19-21]。但是该指标和常见的天气预报量匹配度不够好,在气象和地质部门联合地质灾害预报中的应用度不高。因此本文根据5个不同时效降水指标(常见的天气预报量)与滑坡累积发生概率分布拟合曲线建立贵州省降雨型滑坡预报模型,以提高预报模型的实用性和业务应用效果。

降雨型滑坡是由强降水诱发的滑坡,而贵州省强降水主要集中发生在每年的4—10月。为排除其他降水资料的影响,本文选择4—10月降雨型滑坡样本进行统计分析。同时考虑贵州省区域自动气象站资料的完整性,年份选择2010—2018年。根据5个不同时效降水指标与滑坡累积发生概率分布拟合曲线建立贵州省降雨型滑坡预报模型,该预报模型结合短临天气预报,可及时发布不同地区不同等级滑坡预警预报,有利于决策部门提前做好地质灾害防御工作,避免或减少人员伤亡和财产损失。

1 资料和方法

滑坡灾情资料来自贵州省地质环境监测院,使用2010—2018年的滑坡灾情资料。气象资料来自贵州省气象局信息中心,使用贵州省84个国家气象站和1449个区域自动气象站2010—2018年4—10月逐小时降水资料。由于只针对降雨型滑坡进行特征分析,根据滑坡样本地理位置信息,选取与之距离最近的国家气象站或区域自动气象站同时间段逐小时降水资料,从2010—2018年1394例滑坡资料中剔除非降水因素导致的滑坡样本,选出640个降雨型滑坡样本。利用2010—2017年630个样本数据资料进行分析并建立预报模型,利用2018年10个样本数据对贵州省降雨型滑坡预报模型的检验。

降雨型滑坡大多是由滑坡当日短时强降水和前期累积降水量所造成,因此本文选择表征短时强降水的当日最大小时降水量、3h最大降水量、6h最大降水量、滑坡当日降水量(R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d}),以及表征前期累积降水量的滑坡前期3d有效降水量(R_{3d})这5个降水指标建立不同时效的降雨型滑坡预报模型。日降水量即24h累积降水量,根据气象业务规定,选取前一日20时—当日20时的24h累积降水量作为当日降水量。

本文首先根据2010—2017年630个滑坡样本数据资料对贵州省降雨型滑坡的时空分布特点进行分析,然后统计出 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 和 R_{3d} 5个不同时效降水指标的不同量级降水量条件下滑坡发生概

率。根据二者散点图的分布得到不同时效降水量与滑坡累积发生概率分布的拟合曲线公式,并根据滑坡预报等级表计算出不同概率对应的5个降水指标的降水阈值,从而建立贵州省降雨型滑坡预测模型。最后根据2018年新增的10个滑坡样本的降水数据及拟合公式,分别计算出5个不同时效降水指标的对应概率,结合滑坡预报等级表,发布滑坡的预警预报,完成对贵州省降雨型滑坡预报模型的检验。

2 降雨型滑坡时空分布特征

2.1 降雨型滑坡时间分布特征

贵州省地处中国西南内陆地区腹地,以高原山地居多,山地丘陵面积占92.5%。每年4月第一旬,黔东南中东部和铜仁东部边缘地区率先进入雨季^[22],强降水逐渐增多,由于强降水的影响,滑坡事件递增。10月上旬贵州大部分地区雨季结束,强降水减少,滑坡事件递减。贵州省年平均降水量为1179.6mm,其中4—10月多年平均降水量为1004.2mm,占全年总降水量的85%左右。

由2010—2017年4—10月每月平均降水量和发生降雨型滑坡灾害统计(图1)可知,降雨型滑坡灾害高发期主要集中在5—7月,占比92.4%,其中6月发生概率最高,约48.6%;7月次之,约34.9%。而贵州省降水主要集中在5—8月,其中6月最大,平均降水量为219mm,7月次之,平均降水量为197.1mm,因此贵州省降雨型滑坡灾害高发期与降水集中期在时间上有很好的—致性。

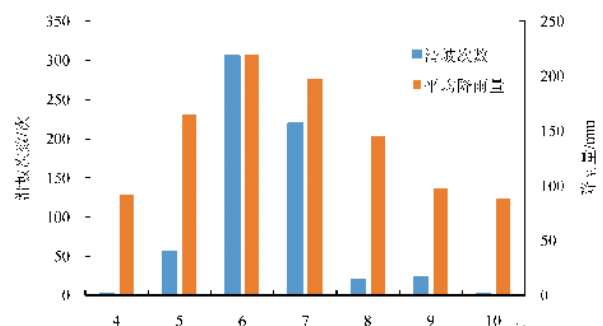


图1 贵州省2010—2017年4—10月各月平均降水量和降雨型滑坡灾害统计

从贵州省9个地州市4—10月各月降雨型滑坡灾害次数(图2)可知,贵州省地州市的降雨型滑坡发生次数变化与雨季开始期的进程在时间上一致。贵州东部地区于4月初率先进入雨季,5月铜仁市、黔东南州以及黔南州进入雨水集中期,该地区降雨型滑坡灾害发生次数也明显增多。5月中旬贵州省

全部进入雨季,随之北部和西部地区降雨型滑坡灾害增多。6月各地进入雨水最集中期,黔东南州、黔南州、黔西南州、安顺市、六盘水市降雨型滑坡灾害次数也相应达到最多。之后,随着副热带高压继续西伸和北跳,毕节市、贵阳市、遵义市以及铜仁市降雨型滑坡灾害次数在7月达到最多。

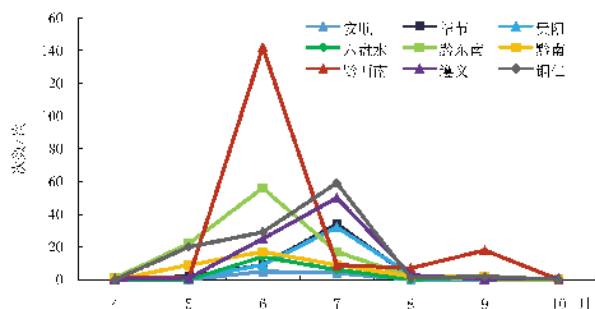


图2 贵州省9个地州市2010—2017年4—10月降雨型滑坡灾害次数统计

从2010—2017年4—10月降雨型滑坡灾害次数统计(表1)可以看出,降雨型滑坡灾害次数呈现逐年波动的变化特征。其中2014年发生次数最多,为187次,2011年次之,为141次,而2013年最少,为23次。

表1 2010—2017年贵州省4—10月降雨型滑坡灾害次数统计

| 年 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 降雨型滑坡次数 | 33 | 141 | 47 | 21 | 187 | 66 | 64 | 71 |

2.2 降雨型滑坡空间分布特征

由图3可知,黔西南州望谟县降雨型滑坡灾害事件最多,为125次,其中122次是由于2011年6月6日该区域出现大暴雨—特大暴雨所致。次大值中心位于遵义市仁怀市,为40次。>10次的高发区域主要集中在遵义市西部、毕节市西部、六盘水市西南部、黔西南州南部、黔东南州中部一带以及铜仁市大部,而中部大部地区属于次数<5次的低发区域。这一分布特征与贵州省地质灾害易发分区图^[8](图4)基本一致。从分区图中可以看出,贵州分为三种等级易发区,其中铜仁市大部、黔东南州北部、遵义市西北部和北部、毕节市大部、六盘水市大部、安顺市西部边缘、黔西南州北部和南部边缘地区为高易发区。黔西南州中部一带和黔南州西部为低易发区,其余地区为中易发区。图3与图4的差异可能是研究样本所选时间段不一致所致。

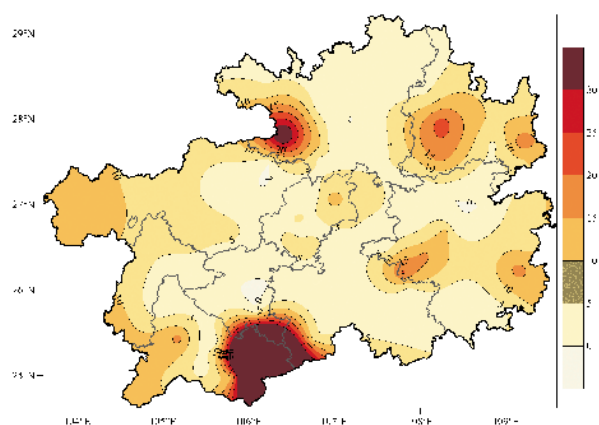


图3 贵州省2010—2017年4—10月降雨型滑坡灾害空间分布



图4 贵州省地质灾害易发分区

3 降雨型滑坡预报模型

贵州省降雨型滑坡灾害高发期与降水集中期在时间上有很好的—致性,并且地州市的降雨型滑坡发生次数变化与雨季开始期的进程在时间上也有很好的一—致性。许多研究表明降水是滑坡发生的主要致灾因子^[8-14],究竟降水量多大会导致降雨型滑坡的发生?需要确定降雨型滑坡阈值并建立降雨型滑坡地预报模型,为决策部署奠定科学支撑。

3.1 降雨指标选取及有效雨量计算

降雨型滑坡大多是由滑坡当日短时强降水和前期累积降水量所造成。因此本文选择表征短时强降水的当日最大小时降水量(R_{1h})、3h最大降水量(R_{3h})、6h最大降水量(R_{6h})、滑坡当日降水量(R_{1d}),以及表征前期累积降水量的滑坡前期3d有效降水量(R_{3d})这5个降水指标建立不同时效的滑坡预报模型。

由于前期不同时间内降水量受时空变化、蒸发、土壤渗透吸收等因素的影响,导致降水量对滑坡的

影响呈现递减规律,因此有效雨量计算公式为:

$$R_n' = R_0 + KR_1 + K^2R_2 + K^3R_3 + \dots + K^nR_n, \quad (1)$$

$$n=0, 1, 2, \dots, n.$$

其中, R_n' 为滑坡暴发前 $n+1$ 天的有效降水量(mm); K 为递减系数,这里取 0.8; R_0 为滑坡当日降水量。

3.2 拟合曲线的选取

根据 2010—2017 年 630 例降雨型滑坡样本统计出 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 和 R_{3d} 5 个不同时效降水指标的不同量级降水条件下滑坡发生概率,根据二者散点图的分布对不同时效降水指标与滑坡发生概率分布进行拟合。在拟合线的选择时发现,采用多项式拟合时,其拟合线的 R^2 更大,因此选择多项式进行拟合。当拟合曲线多项式公式为 2~3 阶时,5 个不同时效降水指标与滑坡概率拟合线的 R^2 均 >0.97 。当拟合曲线公式为 4 阶和 5 阶时,拟合线的 R^2 均 >0.99 ,因此选择 5 阶多项式作为拟合曲线多项公式,即

$$P(R_{1h}) = -2.8244 \times 10^{-8}R_{1h}^5 + 1.4273 \times 10^{-5}R_{1h}^4 - 2.275 \times 10^{-3}R_{1h}^3 + 0.1356R_{1h}^2 - 1.3511R_{1h} + 0.34, \quad (2)$$

$$P(R_{3h}) = -2.467 \times 10^{-9}R_{3h}^5 + 1.6996 \times 10^{-6}R_{3h}^4 - 4.122 \times 10^{-4}R_{3h}^3 + 0.03903R_{3h}^2 - 0.481R_{3h} - 5.71, \quad (3)$$

$$P(R_{6h}) = -1.438 \times 10^{-9}R_{6h}^5 + 1.158 \times 10^{-6}R_{6h}^4 - 3.345 \times 10^{-4}R_{6h}^3 + 0.0399R_{6h}^2 - 1.207R_{6h} + 9.39, \quad (4)$$

$$P(R_{1d}) = -1.496 \times 10^{-10}R_{1d}^5 + 2.295 \times 10^{-7}R_{1d}^4 - 1.042 \times 10^{-4}R_{1d}^3 + 0.0178R_{1d}^2 - 0.629R_{1d} + 5.942, \quad (5)$$

$$P(R_{3d}) = -3.176 \times 10^{-10}R_{3d}^5 + 3.2999 \times 10^{-7}R_{3d}^4 - 1.27 \times 10^{-4}R_{3d}^3 + 0.0211R_{3d}^2 - 0.9616R_{3d} + 12.29. \quad (6)$$

3.3 基于拟合曲线的降雨型滑坡预报模型

对比 5 个不同时效降水指标—滑坡累积发生概率拟合曲线(图 5)来看,5 条拟合线的 R^2 均近似等

于 1,表明拟合度较高。同时从拟合曲线的变化来看,当不同时效降水量开始增大时,滑坡累积发生概率增加并不明显。随着不同时效降水量的增加,降雨型滑坡发生的概率显著增大。最后当不同时效降水量继续增大时,滑坡累积发生概率增加又变得不明显,该现象较符合实际情况。通过公式(2)~(5)推算出降雨型滑坡事件不同概率时对应的降水量。结合中国气象局和中国国土资源部发布的山体滑坡预报等级(表 2),按照 10%、25%、50%、75%和 95%这 5 个滑坡发生概率,得到相应概率下的不同降水指标的阈值(表 3)。其中 25%所对应的降水阈值是发布滑坡预警的下限,即当 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 、 R_{3d} 分别 ≥ 26.9 、48.9、62.9、79.5、92.0 mm 时,发布滑坡预报预警。

表 2 滑坡预报等级及预警措施

| 预警等级 | 滑坡概率/% | 预报用语 | 预警措施 |
|------|----------|---------|-------|
| 1 级 | [0, 10) | 滑坡可能性很小 | 不采取措施 |
| 2 级 | [10, 25) | 滑坡可能性较小 | 不采取措施 |
| 3 级 | [25, 50) | 滑坡可能性较大 | 发布预警 |
| 4 级 | [50, 75) | 滑坡可能性大 | 发布预警 |
| 5 级 | [75, 95) | 滑坡可能性很大 | 发布预警 |

4 降雨型滑坡预报模型检验

4.1 检验结果

为验证降雨型滑坡预报模型的准确性以及 5 个不同降水指标的实用性,选取 2018 年贵州省发生的 10 个降雨型滑坡样本(表 4)对应的降水数据对预报模型进行检验。为排除其他因素的影响,滑坡样本选取 48 h 内至少发生 2 次以上的滑坡样本。将 10 个

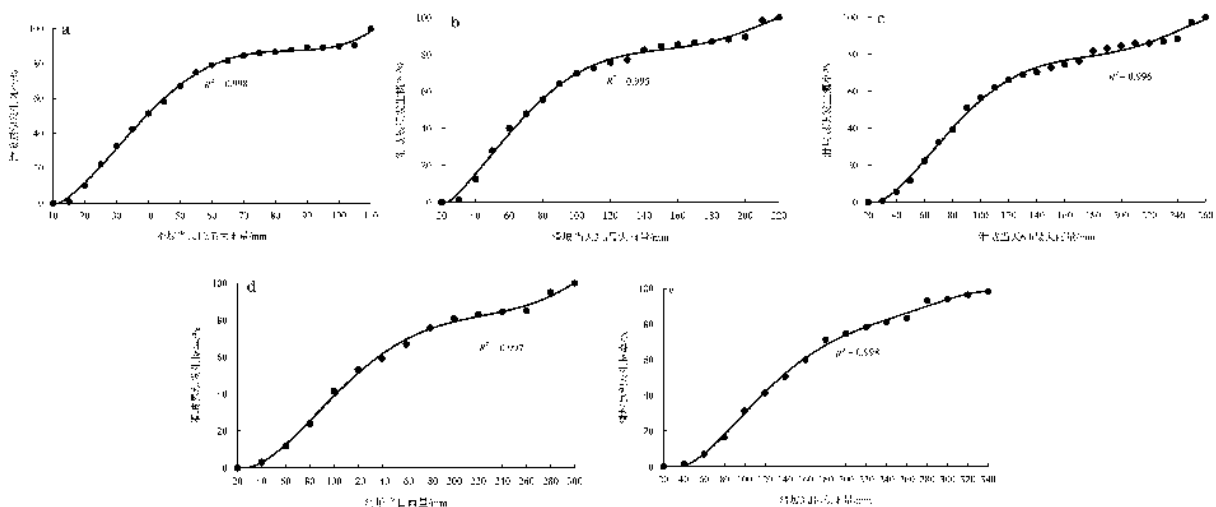


图 5 不同时效降水指标—滑坡累积发生概率拟合曲线

(a 为滑坡当天 1 h 最大雨量, b 为滑坡当天 3 h 最大雨量, c 为滑坡当天 6 h 最大雨量, d 为滑坡当日雨量, e 为滑坡 3 d 累积雨量)

表3 滑坡不同预警等级下不同降水指标阈值/mm

| 预警等级 | R_{1h} | R_{3h} | R_{6h} | R_{1d} | R_{3d} |
|------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1级 | [0,19.1) | [0,34.5) | [0,45.0) | [0,54.9) | [0,75.1) |
| 2级 | [19.1,26.9) | [34.5,48.9) | [45.0,62.9) | [54.9,79.5) | [75.1,92) |
| 3级 | [26.9,39.3) | [48.9,78.6) | [62.9,92.7) | [79.5,118.1) | [92,135.5) |
| 4级 | [39.3,55.9) | [78.6,112.1) | [92.7,149.7) | [118.1,177.8) | [135.5,204.5) |
| 5级 | [55.9,106.8) | [112.1,206.7) | [149.7,247.5) | [177.8,282.5) | [204.5,306.3) |

降雨型滑坡样本对应的不同降水指标代入公式(2)~(5)计算出对应滑坡发生概率,参照表2得到不同降水指标的预警等级(表4)。综合不同降水指标的预报等级,采取就高等级的预报原则得到最终预警等级。当预警等级为3时,即滑坡发生可能性较大,发布滑坡的预警预报。根据这10次降雨型滑坡实况计算出5个不同降水指标的准确率,其中 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 和 R_{3d} 的预报准确率分别为70%、70%、70%、80%和90%。表明降雨型滑坡实况和预报等级基本相符,同时表明降雨型滑坡预报模型有一定的准确性,这5个降水指标均具有一定的实用性。其中利用 R_{3d} 开展降雨型滑坡预报效果明显优于 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 和 R_{1d} ,并且利用 R_{3d} 开展降雨型滑坡预警等级与综合预警等级(表4)完全相同。

4.2 模型优势分析

模型的建立首先考虑了短时强降水和累积有效雨量对降雨型滑坡发生的影响,综合选择了5个不同时效降水指标。该降水指标均是常见的天气预报量,相对于降雨强度(I)与持续时间(D)建立的降雨阈值指标^[18-20]来说,计算简单且实用性较好,有效提高预报模型的实用性和业务应用效果。另外 $I-D$ 模型适用于某区域的研究,而本文中的预报模型既适

用于区域的研究,同时也适用于全省范围的研究。另一方面,5个不同时效降水指标与累积发生概率的拟合线 R^2 均近似等于1,并且5条拟合线的变化规律也较符合实际情况,这是很多滑坡预测模型达不到的。

5 结论

利用贵州省2010—2017年630次降雨型滑坡资料以及国家气象站和区域自动气象站逐小时降水资料,建立贵州省降雨型滑坡预报模型并对其进行了检验,得到以下结论:

(1)贵州省降雨型滑坡灾害高发期主要集中在5—7月,其中6月发生概率最高,约48.6%;7月次之,约34.9%。滑坡高发期与降水集中期在时间上有很好的 consistency,并且各地滑坡发生次数变化与各地雨季开始期进程在时间上有很好的 consistency。

(2)贵州省降雨型滑坡高发区域主要集中在遵义市西部、毕节市西部、六盘水市西南部、黔西南州南部、黔东南州中部一带以及铜仁市大部,而中部大部地区属于低发区域,这一分布特征与贵州省地质灾害易发分区基本一致。

(3)通过5种不同时效降水指标与滑坡累积发生概率拟合曲线建立降雨型滑坡预报模型,并确定不同概率对应的不同时效降水指标阈值,即当 R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 、 R_{3d} 分别 ≥ 26.9 、48.9、62.9、79.5、92.0 mm时,发布滑坡预报预警。随着5个不同时效降水指标降水量增大,降雨型滑坡累积发生概率呈现前后增加缓慢,中间快速增加的变化特征。

(4)利用2018年新增降雨型滑坡样本对预测模型进行检验, R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{1d} 和 R_{3d} 的预报准确率分别达70%、70%、70%、80%和90%,表明降雨型滑

表4 2018年降雨型滑坡预报检验结果

| 发生时间 | 地点 | R_{1h} (预报等级) | R_{3h} (预报等级) | R_{6h} (预报等级) | R_{1d} (预报等级) | R_{3d} (预报等级) | 综合预警等级 |
|------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| 2018-06-22 | 雷山县 | 35.8(3) | 71.5(3) | 93(4) | 166.2(4) | 192(4) | 4 |
| 2018-06-22 | 都匀市(2) | 58.9(5) | 149.8(5) | 208.3(5) | 259.2(5) | 259.2(5) | 5 |
| 2018-06-22 | 麻江县 | 33.3(3) | 58.8(3) | 77.8(3) | 116.1(3) | 201.2(4) | 4 |
| 2018-06-23 | 镇宁县 | 17.8(1) | 36.2(2) | 37.7(1) | 57.7(2) | 114.7(3) | 3 |
| 2018-07-07 | 纳雍县 | 36.6(3) | 44.9(2) | 47.2(2) | 88.7(3) | 128.2(3) | 3 |
| 2018-07-07 | 纳雍县 | 44.9(4) | 91.6(4) | 98.9(4) | 129.4(4) | 175.8(4) | 4 |
| 2018-07-07 | 金沙县 | 24.7(2) | 36.7(2) | 36.8(1) | 36.8(1) | 79.1(2) | 2 |
| 2018-08-07 | 兴仁县 | 24.8(2) | 54.8(3) | 74.6(3) | 85.1(3) | 132.2(3) | 3 |
| 2018-08-08 | 关岭县 | 39.3(4) | 71.9(3) | 104.2(4) | 159(4) | 229.4(5) | 5 |

注:都匀市同一天发生两起滑坡事件。

坡预报模型有一定的准确性,5个降水指标均具有一定的实用性,其中利用 R_{3d} 开展降雨型滑坡预报效果最好。

考虑到贵州省区域站气象资料是否齐整的问题,本文仅选取了2010年以后的资料来建立降雨型滑坡预测模型。另外,由于预报模型是基于数学统计方法建立的,后期仍需根据新增滑坡信息对滑坡阈值模型进行不断的订正,使其在地质灾害防御中起到关键性的作用。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,魏来,谭玲.降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(5):990-996.
- [2] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征—基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-31.
- [3] GUZZITI F,PERUCCACCI S,ROSSI M.Risk -advanced weather prediction system to advise on risk events and management:Definition of critical threshold for different scenarios [J].Action,2005,1(16):28-30.
- [4] CROSTA G B, FRATTINI P. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2003,3:81-93.
- [5] GLADE T,CROZIER M J,SMITH P.Applying probability determination to refine landslide -triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model” [J].Pure and Applied Geo-physics, 2000,157(6-8):1059-1079.
- [6] GUZZITI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe [J].Meteorology and Atmospheric Physics,2007,98(3):239-267.
- [7] GUZZITI F,PERUCCACCI S,ROSSI M,et al.The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows:An update [J].Landslides,2008,5(1):3-17.
- [8] 李忠燕,田其博,章国材,等.铜仁地区滑坡临界雨量研究[J].气象科技,2016,44(4):680-685.
- [9] 刘海知,马振峰,范广洲.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.
- [10] 魏丽,陈双溪,边小庚.暴雨型滑坡灾害因素分析及预测试验研究[J].应用气象学报,2007,18(5):682-689.
- [11] 费晓燕,柳锦宝,屈伯强,等.四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型[J].水土保持通报,2017,37(5):315-321,327.
- [12] 唐红梅,魏来,唐云辉,等.重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):16-22.
- [13] 李媛.四川雅安市雨城区降雨诱发滑坡临界值初步研究[J].水文地质工程地质,2005,32(1):26-29.
- [14] 李长冬,洗进业,刘勇,等.暴雨作用下基于滑坡互信息量的白家包滑坡变形响应机制研究 [J]. 暴雨灾害,2021,40(1):19-26.
- [15] 杜小玲,彭芳,蓝伟,等.“7·23”水城特大滑坡事件的降水背景分析[J].暴雨灾害,2020,39(4):344-353.
- [16] 郑孝玉.滑坡预报研究方法综述[J].世界地质,2000,19(4):370.
- [17] 王仁乔,周月华,王丽,等.大降雨型滑坡临界雨量及潜势预报模型研究[J].气象科技,2005,33(4):311-313.
- [18] YAO W M, LI C D, ZUO Q J, et al. Spatio-temporal deformation characteristics and Triggering factors of Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir region, China [J].Geomorphology,2019,343:34-47.
- [19] 赵海燕,殷坤龙,陈丽霞,等.基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析[J].地质科技通报,2020,39(4):85-93.
- [20] 吴益平,张秋霞,唐辉明,等.基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J].地球科学,2014,39(7):889-895.
- [21] 戴丛蕊,黄玮,李蒙,等.云南降雨型滑坡县级预警雨量阈值分析[J].气象科技,2015,43(4):675-680.
- [22] 李玉柱,许炳南.贵州短期气候预测技术[M].北京:气象出版社,2001:7-8.

Validation of Forecast Model for Rainfall-induced Landslides in Guizhou Province

LI Zhongyan^{1,2}, TIAN Qibo³, ZUO Jin^{1,2}, LUO Yanghuan^{1,2}, CAO Wei^{1,2}

(1. Guizhou Climate Center, Guiyang 550002, China;

2. Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources of Guizhou Province, Guiyang 550002, China;

3. Guizhou Institute of Geo-Environment Monitoring, Guiyang 550004, China;

4. Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China)

Abstract Based on data from 630 cases of rainfall-induced landslides from 2010 to 2017 and hourly precipitation data from observation stations, the study analyzes the spatial and temporal characteristics of rainfall-induced landslides in Guizhou province. The formulas containing five precipitation indexes in different time scales and cumulative probabilities of landslides by curve fitting are built, from which the thresholds for five precipitation indexes in different time scales with different probabilities are defined. The forecast model of rainfall-induced landslides is built and then further validated by using cases of rainfall-induced landslides in 2018. The results are as follows: Rainfall-induced landslides occur most frequently from May to July with the maximum frequency occurring in June about 48.6%, followed by July about 34.9%. Issue rainfall-induced landslides warning when R_{1h} , R_{3h} , R_{6h} , R_{24h} and R_{3d} are greater than or equal to 26.9, 48.9, 62.9, 79.5, 92.0 mm respectively. In forecast model, with the increasing of precipitation amount related to indexes in five time scales, the cumulative probabilities of rainfall-induced landslides show rapid increase in the middle while slow increase in the beginning and the end. The validation results indicate the accuracy of model and the usability of five precipitation indexes with the most accuracy by utilizing R_{3d} .

Key words rainfall-induced landslides; probability; different time scales; forecast model