

铜仁地区滑坡临界雨量研究

李忠燕^{1,2} 田其博³ 章国材^{4*} 张东海^{1,2}

(1 贵州省气候中心, 贵阳 550002; 2 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002;
3 贵州省地质环境监测院, 贵阳 550004; 4 国家气象中心, 北京 100081)

摘要 利用铜仁地区 2010—2014 年以来 61 起滑坡事件对应的区域气象站以及气象台站逐小时降水资料, 采用统计分析的方法分析了滑坡发生前后的降水类型, 建立了不同时效的有效雨量和激发雨量组合的预报模型。结果表明: 滑坡前期 3 天累积雨量与滑坡暴发当日 3 h 最大雨量组合预报模型的准确率最大, 空报率最小, 滑坡暴发当日 24 h 雨量与滑坡暴发当日 3 h 最大雨量组合预报模型的准确率次之, 并分别得到这两种情况下判断滑坡是否发生的判别曲线, 根据判别曲线和 24 h 及 3 h 降水预报, 可以制作铜仁地区的滑坡预报。

关键词 临界雨量; 滑坡; 区域站; 预报模型

引言

滑坡和泥石流每年都造成大量的人员伤亡和财产损失, 因此滑坡和泥石流预报对于保障人民生命财产的安全具有重要意义。但是, 滑坡和泥石流的形成机理十分复杂, 基于地质灾害形成机理的预报尚处于探索阶段, 统计预报仍是目前业务应用最多的一种预报方法, 它主要是对发生的地质灾害历史事件进行统计分析, 确定临界降雨量, 并以此作为地质灾害预报的依据^[1]。魏丽等通过监测试验^[2]指出临界雨量的值域的变化与滑坡体的土壤结构、力学性质、植被覆盖程度和降水强度的时空分布等因素有关。降水与滑坡的形成有着紧密的联系, 并且降水对滑坡的作用是一个动态过程, 降雨量大小、强度、历时长短等均影响滑坡的形成, 这是因为降雨可以降低岩土自身的物理性能, 改变斜坡周边的地下水条件, 并成为斜坡最终发生失稳破坏的触发因素^[2-11]。因此, 研究滑坡发生的临界雨量成为目前滑坡预报工作的有效途径, 也是目前技术条件下有效的预报方法。国内外学者针对降雨诱发的滑坡做了大量研究, 降雨诱发滑坡阈值的概念首先由

Caine^[12] 提出来, 之后人们将这种降水阈值作为预测滑坡的判据, 并称之为临界雨量模型^[1]。临界雨量模型不需要严格的数学推导和物理规律, 是一种基于滑坡和降雨数据的统计模型, 只要能够获得滑坡及引发滑坡的降水资料, 就可以建立滑坡临界雨量模型。

贵州省铜仁市处于云贵高原向湘西丘陵过度的斜坡地带, 西北高, 东南低, 属于武陵山区腹地, 全市最高海拔 2572 m, 最低海拔 205 m, 地貌以低中山丘陵为主, 其次为高中山和河谷盆地, 本区地貌条件在很大程度上受地质构造控制。铜仁地区降雨充沛, 年降水量在 1250 mm 左右, 其中 4—9 月降水量占全年降水总量 70% 以上。研究表明^[13]: 近 40 年铜仁大部分地区年雨量呈增多的趋势, 雨日呈现显著减少趋势, 说明降水越来越集中, 强度在增加。由于降水强度的增加, 导致极端降水事件不断发生, 加上铜仁地区的地形地貌从而引发地质灾害的不断发生。根据国土部门提供的贵州省地质灾害易发分区图来看, 铜仁地区大部地区属于高易发区。

考虑到区域气象站的建站时间, 我们选取了 2010—2014 年以来铜仁地区发生的 61 个由于强降

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程项目“贵州省开展省级精细化暴雨洪涝灾害风险普查”、中国清洁发展机制基金赠款项目(2013031)“贵州省气候变化影响评估及应对服务”资助

作者简介: 李忠燕, 女, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事气候变化、短期气候预测工作, Email: 523257762@qq.com

收稿日期: 2015 年 7 月 6 日; 定稿日期: 2015 年 12 月 15 日

* 通信作者, Email: zhanggc@cma.gov.cn

水导致的滑坡样本,利用滑坡发生点最近的县气象站或区域气象站逐小时雨量资料,对引发滑坡的降雨类型进行了分析,同时对比分析了 5—9 月未发生滑坡与发生滑坡的降雨量样本,通过统计的方式确定出滑坡和未发生滑坡的雨量判别线,得出发生滑坡的有效雨量和激发雨量判别方程。利用 24 h 雨量和激发雨量预报就可以及时发出滑坡预警,在地质灾害防御中起到重要作用。

1 资料

选取贵州省国土环境资源厅提供的 2010—2014 年以来铜仁地区 72 起滑坡事件(表略)作为滑坡临界雨量的研究对象,由于国土部门只给出了发生滑坡点的地名,而没有给出精确的经纬度坐标信息,所以结合滑坡点地名与区域站站名来选取滑坡发生点最近的区域气象站或县气象站(图 1)逐小时雨量作为确定滑坡临界雨量的基础数据,得到滑坡和降雨数据都齐备的 61 个样本。

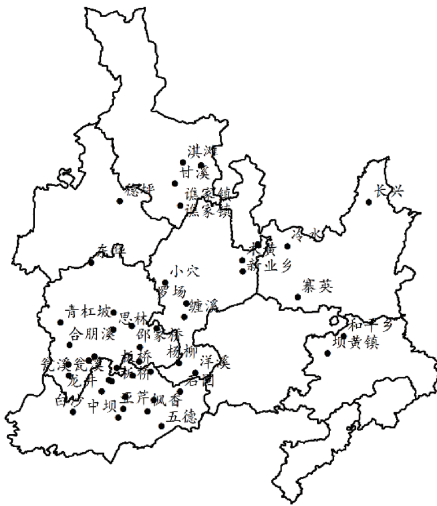


图 1 铜仁地区滑坡发生点对应的气象观测站和区域气象站分布

根据国土部门提供的贵州省地质灾害易发分区图(图 2,彩页),铜仁地区发生的 61 个滑坡样本均在高易发区内,因此,我们可以将这 61 个滑坡样本放在一起进行统计分析。因为这 61 个滑坡样本均发生在 5—9 月,所以我们选取铜仁地区县气象站、区域气象站 5—9 月发生滑坡的降雨量样本与未发生滑坡的样本一起进行统计分析,研究滑坡和未发生滑坡的雨量判别线。

2 滑坡临界雨量分析

一般认为,降雨型滑坡和泥石流是前期有效雨量和激发雨量共同作用的结果^[1]。下面我们来分别讨论铜仁地区 5—9 月滑坡的有效雨量和激发雨量问题,并在此基础上建立铜仁地区滑坡临界雨量模型。

2.1 降雨类型和有效雨量分析

利用滑坡发生点附近的区域气象站逐小时降水资料,分析滑坡发生前 2 天至滑坡发生当日降水类型。铜仁地区这 61 次滑坡的降水类型可以划分成 4 种类型,即单峰型、双峰型、多峰型和波动降水型。对于单峰型降水(图 3)来说,前期降水量很小(小于 10 mm),但在滑坡发生当日,雨量过程线存在明显的峰值,滑坡发生前降雨量突然增大出现尖峰。对于双峰型降水来说,前期降水量相对较大(一般 24 h 降水量大于 25 mm),且雨量过程线存在一个峰值;在滑坡发生当日,雨量过程线出现更加明显的峰值。例如,石阡县 2014 年 6 月 4 日(图 4)这次滑坡,前 2 天降水量较大(69.6 mm),并且雨量过程线出现明显的峰值;滑坡发生当日降雨量更大,滑坡前 1 h 最大降雨量达 100.1 mm,导致 2014 年 6 月 4 日石阡县发生大型滑坡事件。第 3 种是多峰型降水,滑坡前期至滑坡发生当日,雨量过程线存在 3 个以上的峰值的降水(图 5)。第 4 种是波动型降水,滑坡前期至滑坡发生当日,雨量过程线的峰值均小于前 3 种降水类型,降水强度波动且降水历时较长、累积降水量大(图 6)。表 1 给出了铜仁地区引发滑坡 4 种降水类型的出现频次。从表 1 可以看出,对于 2010 年以来铜仁地区 5—9 月这 61 次滑坡来说,降水类型主要以双峰型为主,单峰型次之,而波动型降水最少。虽然波动降水型出现次数少,但它揭示出

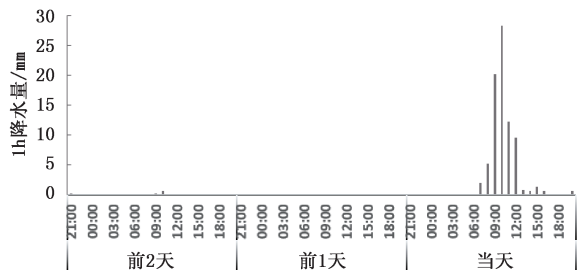


图 3 单峰型降水

(贵州石阡县 2010 年 5 月 31 日滑坡点对应 R6810 站逐小时降水量时间序列)

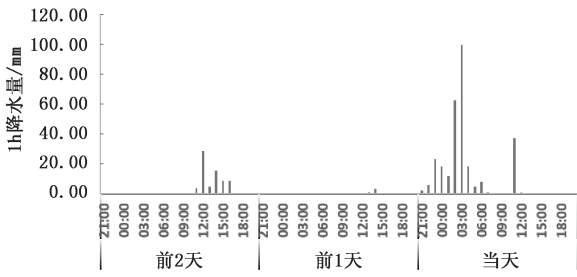


图4 双峰型降水

(贵州石阡县 2014 年 6 月 4 日滑坡点对应 57734 站逐小时降水量时间序列)

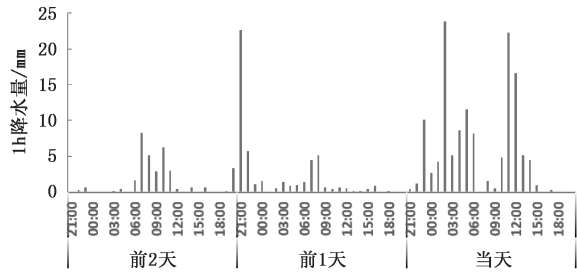


图5 多峰型降水

(贵州松桃县 2012 年 7 月 18 日滑坡点对应 R6219 站逐小时降水量时间序列)

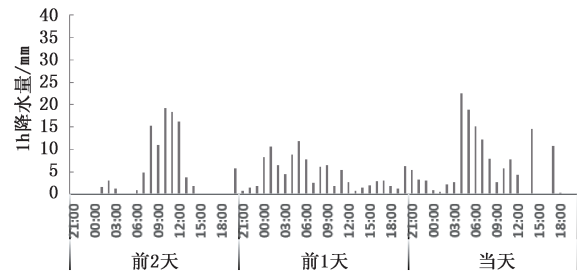


图6 波动型降水

(贵州松桃县 2014 年 7 月 15 日滑坡点对应 R6620 站逐小时降水量时间序列)

如下一个现象:如果前期累积雨量大,激发雨量不是很大也可以诱发滑坡。这是因为前期降雨下渗后减小了滑坡体与岩石之间的摩擦力,使得边坡的稳定度减小了的缘故。因此,在临界雨量模型中必须包括有效雨量,对于铜仁地区 5—9 月,有效雨量的累积雨量日数为 3 天。

前期有效雨量是指滑坡暴发前对固态补给物质含水状况仍起作用的降雨量,它受时空的变化、辐射强度、蒸发量以及土壤渗透能力等多种因素的影响^[9],为了正确提示固态补给物质含水率的实际情况,可采用下式计算有效雨量:

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

其中 R_n 为滑坡暴发前 $n+1$ 天的逐日降雨量 (mm), K 为递减系数, K 值一般取为 0.8 左右^[1], 可根据天气状况的不同而确定恰当的 K 值, 这里我们取 0.8。

对于这 61 次滑坡事件, 3 天有效雨量的平均值为 176.2 mm, 其中最大值为 414.9 mm, 最小值为 64.3 mm, 并且 3 天有效雨量平均 82% 来自当日有效雨量(表 1)。

表 1 铜仁地区 61 次滑坡降水类型统计表

类型	单峰型	双峰型	多峰型	波动型
次数(次)	15	28	16	2
所占比例/%	24.6	45.9	26.2	3.3

2.2 降雨强度历时和激发雨量分析

利用滑坡发生点对应气象(区域)站逐小时降水资料,统计滑坡发生前 2 天至滑坡发生当日每天大于 10 mm/h 和 20 mm/h 的降雨的历时(图 7、8, 彩页)。从图 7 中可以看出,对于铜仁地区这 61 次滑坡来说,大于 10 mm/h 降雨主要集中在滑坡发生当天,滑坡发生当天大于 10 mm/h 降雨历时为 2~7 h, 平均为 3 h; 滑坡发生前期 3 天内大于 10 mm/h 降雨历时为 2~14 h; 同样的,大于 20 mm/h 降雨也集中在滑坡发生当天,滑坡发生当天大于 20 mm/h 降雨历时为 0~5 h, 这说明在前期累积降水较大,降雨强度小于 20 mm/h(但必须大于 10 mm/h)时也可能发生滑坡;滑坡发生前期 3 天内大于 20 mm/h 降雨历时为 0~8 h。可以看出,滑坡对应的强降雨历时时间都较短,强降雨主要集中在滑坡发生当天,且激发雨量大于 10 mm/h, 平均历时为 3 h。因此,可以将小时雨量大于 10 mm/h 作为铜仁地区 5—9 月滑坡的起报条件,即小时雨量大于 10 mm/h 时,铜仁地区才有可能发生滑坡。

2.3 滑坡临界雨量预报模型的建立

在以上定性分析的基础上,我们来建立定量的滑坡临界雨量模型。多数人认为滑坡的暴发与当日 1 h 最大雨量、3 h 最大雨量、24 h 雨量以及前期雨量都有着密切的联系^[14-18]。但是,多长时效的有效雨量和激发雨量的组合最适合铜仁地区 5—9 月的滑坡预报? 根据 3.2 节的分析,我们来设计 4 种组合(表 2)。

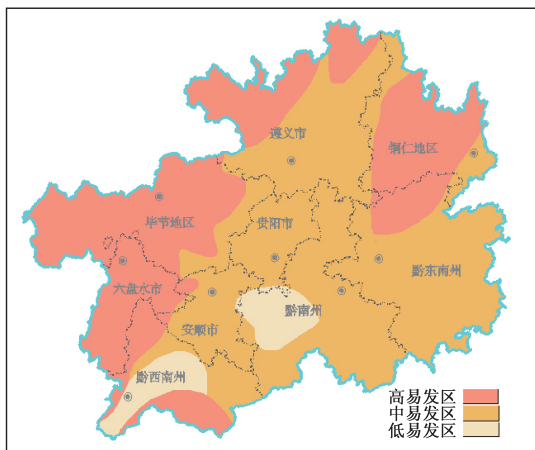


图 2 贵州省地质灾害易发分区

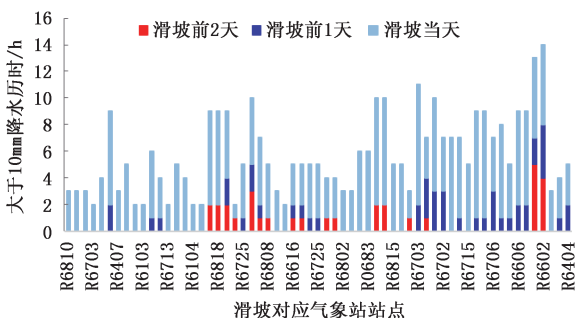


图 7 滑坡前期 2 天至滑坡当天每天大于 10 mm/h 降水的历时

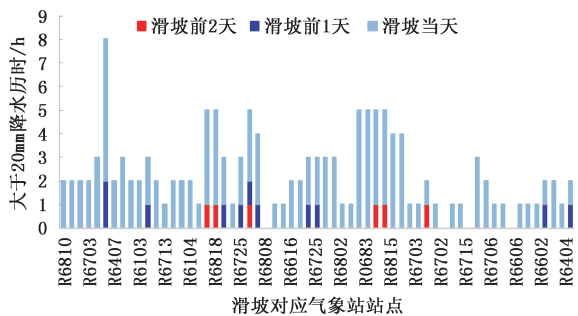


图 8 滑坡前期 2 天至滑坡当天每天大于 20 mm/h 降水的历时

表 2 不同时效有效雨量与激发雨量的组合

		激发雨量时效为 1 h		激发雨量时效为 3 h	
有效雨量为	1 d	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
	3 d	组合 3	组合 4	组合 1	组合 2

以有效雨量为横坐标、激发雨量为纵坐标制作 4 种有效雨量与激发雨量组合下的点聚图。以发生滑坡最小激发雨量作为基值,挑选出铜仁地区 2010

年至 2014 年 5—9 月中任何一个区域气象站 1 h 降雨量大于基值的日期,在每一种组合中,根据它们的前期有效雨量和最大激发雨量,在点聚图中用▲或■标注出现滑坡、用×标注未出现滑坡。可以得到 4 张点聚图,这里仅给出 3 天有效雨量与滑坡当日最大 3 h 雨量、1 天有效雨量与滑坡当日 3 h 最大雨量两张点聚图(图 9 和图 10)。

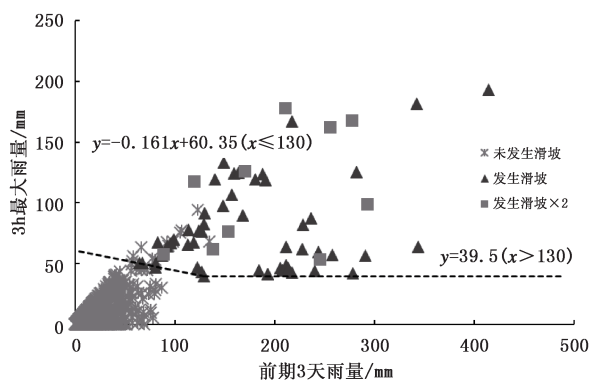


图 9 滑坡前 3 天累积雨量与滑坡当日 3 h 最大雨量点聚图

(注:▲一个区域气象站降水对应一个滑坡样本, ■一个区域气象站降水对应两个滑坡样本)

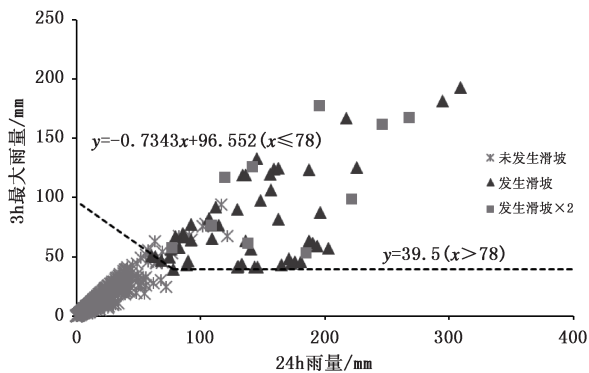


图 10 同图 9,但为滑坡当日雨量与 3 h 最大雨量点聚图

由于滑坡可能造成人员伤亡,因此滑坡预报应当贯彻“宁可空报,不可漏报”的原则,以点聚图中数据整体分布趋势绘制临界雨量判别线,确定判别线公式的原则是最大限度的区分发生滑坡和未发生滑坡,从而得到每种有效雨量与激发雨量组合下滑坡临界雨量公式如下:

滑坡当日 1 h 最大雨量与滑坡当日 24 h 雨量组合确定的滑坡判别线公式为:

$$\begin{cases} R_{1h_{max}} \geq -1.18R_{24h} + 98.512 & (\text{当 } R_{24h} \leq 68.4) \\ R_{1h_{max}} \geq 17.8 & (\text{当 } R_{24h} > 68.4) \end{cases} \quad (2)$$

滑坡当日3 h最大雨量与滑坡当日24 h雨量组合的滑坡判别线的公式为:

$$\begin{cases} R_{3h_{max}} \geq -0.7343R_{24h} + 96.552 & (\text{当 } R_{24h} \leq 78) \\ R_{3h_{max}} \geq 39.5 & (\text{当 } R_{24h} > 78) \end{cases} \quad (3)$$

滑坡当日1 h最大雨量与滑坡发生前3天累积雨量组合的滑坡判别线的公式为:

$$\begin{cases} R_{1h_{max}} \geq -0.3708R_{3d} + 47.825 & (\text{当 } R_{3d} \leq 81) \\ R_{1h_{max}} \geq 17.8 & (\text{当 } R_{3d} > 81) \end{cases} \quad (4)$$

滑坡当日3 h最大雨量与滑坡发生前3天累积雨量组合的滑坡判别线的公式为:

$$\begin{cases} R_{3h_{max}} \geq -0.161R_{3d} + 60.35 & (\text{当 } R_{3d} \leq 130) \\ R_{3h_{max}} \geq 39.5 & (\text{当 } R_{3d} > 130) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $R_{1h_{max}}$ 、 $R_{3h_{max}}$ 、 R_{24h} 和 R_{3d} 分别表示滑坡当日1 h最大雨量、滑坡当日3 h最大雨量、滑坡当日24 h

雨量和滑坡前3天(包括当天)累积雨量。

由于建模时遵从“宁可空报,不可漏报”的原则,因此式(2)~(5)的滑坡临界雨量模型不存在漏报率。根据滑坡判别线式(2)~(5),容易计算每种情况下发生滑坡和未发生滑坡的次数,从而计算出式(2)~(5)的临界成功指数以及空报率,见表3。从表3可以看出,滑坡前期3天累积雨量与滑坡当日3 h最大雨量组合的临界成功指数最大,空报率最小;滑坡暴发当日24 h雨量与滑坡暴发当日3 h最大雨量组合的临界成功指数也高于另外两种雨量组合,因此将3 h最大雨量作为滑坡发生的激发雨量比1 h最大雨量作为滑坡的激发雨量更为合理的。

就铜仁地区滑坡而言,利用建立的滑坡临界雨量模型和24 h雨量预报(3天有效雨量中前2天是降雨实况)及3 h最大雨量预报就可以及时发出滑坡预警。从已经发生地质灾害的调查实例来看,最大雨量出现到滑坡的暴发一般至少有0.5~2 h的时间间隔^[19],因此,即使是临近预报出3 h降雨量,也可以提前预报滑坡,能够在地质灾害防御中起到重要作用,从而有力地推进气象灾害风险管理工作。

表3 不同有效雨量与激发雨量组合的临界雨量模型拟合结果

	24 h雨量与当日 1 h最大雨量	24 h雨量与当日 3 h最大雨量	3天雨量与当日 1 h最大雨量	3天雨量与当日 3 h最大雨量
拟合总次数	96	92	112	90
空报次数	35	31	51	29
拟合正确次数	61	61	61	61
临界成功指数	63.5	66.3	54.4	67.8
空报率	36.5	33.7	45.6	32.2

注:临界成功指数=拟合正确次数/拟合总次数,空报率=空报次数/拟合总次数。

3 结论

通过对铜仁地区2010年以来的61起滑坡事件对应的降水量的初步分析,得到以下结论:

(1)由强降水导致的滑坡对应的降水类型基本属于尖峰型降水,其中主要以双峰型为主,单峰型次之,强降雨主要集中在滑坡发生当天,且激发雨量大于10 mm/h。

(2)不同有效雨量与激发雨量组合的滑坡判别线形态有所不同。

(3)滑坡前期3天累积雨量与滑坡暴发当日3 h最大雨量组合预报模型的临界成功指数最大,空报率最小;滑坡暴发当日24 h雨量与滑坡暴发当日3

h最大雨量组合预报模型的临界成功指数也高于另外两种实时雨量组合,因此将3 h最大雨量作为滑坡发生的激发雨量比1 h最大雨量作为滑坡的激发雨量更为合理的。

(4)就铜仁地区而言,利用建立的滑坡临界雨量模型和24 h雨量预报(3天有效雨量前2天是降雨实况)及3 h最大雨量预报就可以及时发出滑坡预警,即使能够临近预报出3 h降雨量,也可以提前预报滑坡,可以在地质灾害防御中起到重要作用。

我们的这项研究仍然是初步的,铜仁地区虽然是地质灾害高易发区,但是各地的地质条件还存在差异,需要针对不同的地质条件分别建立滑坡临界雨量模型,但这需要积累更多的资料。另外,区域气

象站的降雨资料对局地降水的分辨率还存在不足,解决的办法是在地质灾害高易发区加密建设自动雨量站,这已超出本文的讨论范围。

参考文献

- [1] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 56-60.
- [2] 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.
- [3] 陈洪凯, 魏来, 谭玲. 降雨型滑坡经验性降水阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 990-996.
- [4] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述[J]. 世界地质, 2009, 19(4): 370.
- [5] 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.
- [6] Ocakoglu F, Gokceoglu C, Ercanoglu M. Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study form NW Turkey [J]. Geomorphology, 2002, 42: 329-341.
- [7] Azzoni A, Chiesa S, Frassoni A, et al. The Valpola landslide [J]. Eng Geol, 1992, 33: 59-70.
- [8] Canuti P, Focardi P, Garzonio C A. Correlation between rainfall and landslides [J]. Bull Int Assoc Eng Geol, 1985, 32: 49-54.
- [9] 余峙丹, 张辉, 郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 136-140.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. Geografiska Annuler: Series A, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [13] 谢仁波, 舒国勇, 晏理华, 等. 近 40a 铜仁地区雨量和雨日的变化特征[J]. 贵州气象, 2011(4): 29-31.
- [14] Chang Kangtsung, Chiang Shouhao. An integrated model for predicting rainfall induced landslides [J]. Geomorphology, 2009, 105: 366-373.
- [15] 王迎春, 钱婷婷, 郑永光, 等. 对引发密云泥石流的局地暴雨的分析和诊断[J]. 应用气象学报, 2003, 14(3): 277-286.
- [16] 丁继新, 杨志法, 尚彦军, 等. 降雨型滑坡时空预报新方法[J]. 中国科学 D 辑地球科学. 2006, 36(6): 579-586.
- [17] 马力, 廖代强. 重庆市山体滑坡气象条件等级预报业务系统[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 122-124.
- [18] 李秀珍, 许强. 滑坡预报模型和预报判据[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 71-78.
- [19] 韦京莲, 赵波, 董桂芝. 北京山区泥石流降雨特征分析及降雨预报初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 10(5): 45-51.

Study of Critical Rainfall of Landslides over Eastern Guizhou

Li Zhongyan^{1,2} Tian Qibo³ Zhang Guocai⁴ Zhang Donghai^{1,2}

(1 Guizhou Climate Center, Guiyang 550002; 2 Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources of Guizhou, Guiyang 550002; 3 Guizhou Institute of Geo-Environment Monitoring, Guiyang 550004; 4 National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: Using the hourly precipitation data from automatic meteorological stations and meteorological observation stations corresponding to 61 landslides from 2010 to 2014 in Tongren, the eastern Guizhou, the types of rainfall before and after landslide are analyzed by using statistical analysis. The prediction method of landslides is discussed by using different combinations between cumulative rainfall and triggering rainfall. It is found that the forecast accuracy of the model is the best, and the false alarm rate is the smallest when using cumulative rainfall from two days before the day landslide occurred and the triggering maximum rainfall in 3 hours of the day landslide occurred. The model using the cumulative rainfall of the day landslide occurred and the triggering maximum rainfall in 3 hours of the day landslide occurred takes the second place. The discriminate curve whether the landslide occurred can be obtained in both cases. A landslide can be predicted according to the discriminate curve and precipitation forecasts for the next 24 hours or 3 hours.

Keywords: critical rainfall; landslide; automatic meteorological station; forecast model