遵义市不同地质灾害易发区滑坡临界雨量研究

李忠燕[1,2]，田其博[3]，张东海[1,2]，严小冬[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)

摘　要：[目的] 确定遵义市不同地质灾害易发区的滑坡临界雨量，建立阈值模型并对其进行检验评估，为该地区滑坡预测提供科学依据。[方法] 利用遵义市 2010—2016 年 59 次滑坡事件对应的逐小时降雨资料，采用统计方法对不同地质灾害易发区的滑坡临界雨量的历时、降雨类型对比分析，建立阈值模型并对其进行检验评估。[结果] 中锋型是主要的降雨类型；大于 10 和 20 mm/h 强降雨基本来自滑坡发生当天，但中易区降雨历时均长于高易区的降雨历时。对于高易区来说，滑坡当日 1 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合的阈值模型预报准确率最大，因此将滑坡当天 1 h 最大雨量作为高易区滑坡发生的激发雨量。而对于中易区来说，滑坡当天 3 h 最大雨量是其滑坡发生的激发雨量。[结论] 不同等级地质灾害易发区其滑坡临界雨量不同。对已经确定的滑坡阈值模型需根据新增滑坡信息进行检验评估，如果预测模型对新增滑坡预测不准确，需调整其滑坡判别线，从而对阈值模型进行订正。

关键词：临界雨量；滑坡；区域站；阈值模型

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2018)06-0217-07　　**中图分类号**：P426.62

文献参数：李忠燕，田其博，张东海，等. 遵义市不同地质灾害易发区滑坡临界雨量研究[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：217-223. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.034. Li Zhongyan, Tian Qibo, Zhang Donghai, et al. Critical rainfall of landslides at Zunyi City in different geological Hazard Prone regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 217-223.

Critical Rainfall of Landslides at Zunyi City in Different Geological Hazard Prone Regions

LI Zhongyan[1,2], TIAN Qibo[3], ZHANG Donghai[1,2], YAN Xiaodong[1,2]

(1. *Guizhou Climate Center*, *Guiyang*, *Guizhou* 550002, *China*; 2. *Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources of Guizhou Provice*, *Guiyang*, *Guizhou* 550002, *China*; 3. *Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring*, *Guiyang*, *Guizhou* 550004, *China*)

Abstract: [Objective] The objectives of this study were to determine the critical rainfall of landslide and establish the threshold model of landslide in different geological hazard prone areas of Zunyi City in order to provide scientific basis for landslide prediction in this area. [Method] Hourly precipitation data from 2010 to 2016 were collected from automatic meteorological stations according to 59 landslides of Zunyi City in the Northern Guizhou Province. According to the duration and type of rainfall, the landslide were classified by using statistical analysis in different geological regions and the prediction model of threshold was established and assessed. [Results] Heavy rainfall of more than 10 mm/h and 20 mm/h generally occurred on the day of landsliding, but the duration of rainfall in the middle susceptible area was longer than in the high susceptible area. The uniform pattern of rainfall is the main pattern. For the the high susceptible area, the forecasting accuracy of the threshold model was the best using the parameters the maximum rainfall of 1 hour during the landsliding day and the cumulative rainfall of two days before the landsliding day. Therefore, the maximum

收稿日期：2018-07-05　　**修回日期**：2018-07-09

资助项目：中国清洁发展机制基金赠款项目“贵州省气候变化影响评估及应对服务”(2013031)；中国气象局气候变化专项“西南区域持续性干旱特征及其成因分析”(CCSF201708)；国家自然科学基金项目(41865005)；贵州省气候中心山洪地质灾害防治气象保障工程项目 2018 年建设项目

第一作者：李忠燕(1986—)，女(汉族)，四川省隆昌县人，硕士，主要从事气候与气候变化方面的研究。E-mail：523257762@qq.com。

通讯作者：严小冬(1979—)，男(苗族)，贵州省思南县人，硕士，主要从事气候预测，气候变化方面的研究。E-mail：734909254@qq.com。

rainfall of 1 hour during the landslidubg day was the triggering rainfall. For the middle susceptible area, the forecasting accuracy of the threshold model was the best using the parameters of the maximum rainfall of 3 hours during the landsliding day and the cumulative rainfall of the landsliding day. Therefore, the maximum rainfall of 3 hours was the triggering rainfall. [Conclusion] The critical rainfall of landslide varied among different geological regions. According to the new landslide information, the identified critical rainfall forecasting model is tested and evaluated. If the forecasting model is inaccurate for the new landslide, the landslide discriminant line must be adjusted so that the adjusted prediction model accurately predicts the landslide.

Keywords: critical rainfall; landslide; automatic meteorological stations; theshold model

滑坡地质灾害所造成的危害已不容忽视,尤其是强降雨导致的滑坡,它不仅威胁着道路交通等基础设施及环境的安全,更带来巨大的生命财产损失。国内外大量研究表明:降雨是滑坡地质灾害发生的主要诱因,由强降雨导致的滑坡占九成以上。对滑坡的临界雨量进行研究为滑坡的预测预报预防提供指导,进而减轻和避免滑坡灾害发生[1-3]。目前滑坡降雨阈值大致分为物理性降雨阈值[4-7]和经验性降雨阈值[8-10]两大类,前者主要是从物理力学的角度得到水力条件与斜坡失稳过程模型确定降雨阈值,后者基于客观灾情数据和降雨数据建立统计预测模型确定降雨阈值,由于其不需要数学和物理理论推导且数据易得因此发展迅速,并在降雨型滑坡预报中作用明显。中国西南地区的滑坡基本为堆积层滑坡和基岩滑坡[11],而造成这类型滑坡的诱发因素大多是短历时强降雨[12-15]。

遵义市位于贵州北部,处于云贵高原向湖南丘陵和四川盆地过渡的斜坡地带,地形起伏大,地貌类型复杂,海拔高度一般在 800～1 300 m,在全国地势第二级阶梯上。遵义市属亚热带季风气候,每年 4 月,当来自孟加拉湾和印度洋的西南气流北上致使水汽大量增加,遵义市中到大雨天气常常出现,于 4 月中旬前后进入雨季。遵义市地区降雨充沛,年降雨量为 1 084 mm,其中汛期(4—9 月)降雨量占全年总量 77%以上。进入雨季后,随着强降雨事件的频繁发生,对岩土体不断进行冲蚀,迫使斜坡失稳诱发滑坡发生。从贵州省地质灾害易发分区图来看,遵义市西北部和北部地区属于高易发区,而其它地区属于中易发区。陈洪凯等[11]认为不同的地质条件、不同的滑坡类型其临界雨量也有所不同,这是因为滑坡可以按照岩土性质、滑动面深度和滑坡体积大小分为不同类别的滑坡,其降雨阈值也有所不同。上述关于滑坡临界雨量的研究大多都基于某一种类型,对同一个地区不同地质条件下滑坡临界雨量的研究却很少。不同等级的地质条件下,其降雨型滑坡致灾临界雨量是不同的,简单地说,高易发区的致灾临界雨量低于不易发生区的致灾临界雨量,因此需要在不同的地质灾害易发区建立不同致灾临界雨量的预测模型,并且对预测模型进行检验评估,以此探寻不同地质区强降雨型滑坡灾害的规律,为滑坡预测预报提供科学指导,推进气象灾害防御服务工作。本文根据贵州省遵义市地区 2010—2016 年地质灾害明细统计表,将发生在不同地质灾害易发条件下的滑坡进行分类,利用 2010—2014 年的不同地质灾害易发区灾害样本和降雨建立不同的致灾临界雨量的统计预测模型,再利用 2015—2016 的地质灾害和降雨对预测模型进行检验评估,获取遵义市地区不同地质灾害易发区滑坡的临界雨量,利用这个临界雨量结合临近天气预报及时发出滑坡预警,在地质灾害防御中起到重要作用。

1 资料与方法

1.1 资 料

采用的数据资料有贵州省国土资源厅提供的 2010—2016 年遵义地区滑坡灾情资料(图 1)和贵州省遵义市 460 个区域站对应时段的逐小时降雨资料。

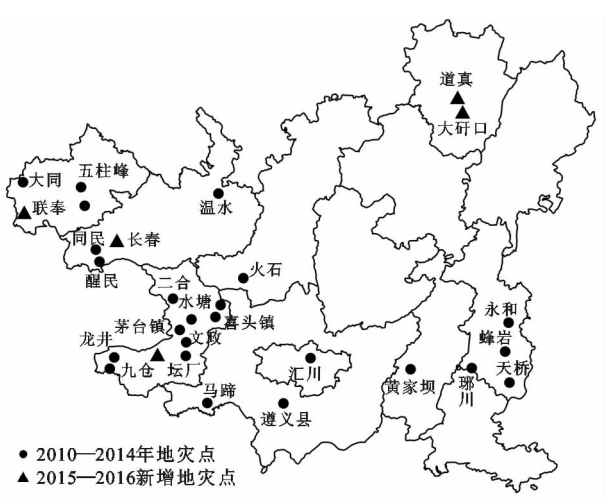


图 1 遵义地区滑坡发生点分布

1.2 方 法

根据贵州省地质灾害易发区分区图来看,遵义市分为两种地质灾害易发区,其中西北部和北部地区属于高易发区,而其他大部地区属于中易发区。因此首先将不同地质灾害易发区 2010—2014 年的滑坡样本(表 1)与该地区降雨数据建立滑坡致灾统计预测模

型,再利用不同地质灾害易发区 2015—2016 年的滑坡灾害样本和降雨对预测模型进行检验评估,订正已建立的滑坡致灾统计预测模型。主要运用统计方法完成对遵义市不同地质灾害易发区滑坡临界雨量的分析研究。

表 1　遵义市不同地质灾害易发区滑坡样本个数　　个

不同地质灾害易发区	2010—2014 年	2015—2016 年
高易区	25	1
中易区	29	4

影响滑坡的降雨分为前期有效雨量、当日雨量、临界雨量[16-19]。其中前期有效雨量是指滑坡发生前天的累积有效,其计算公式为:

$$R_n=R_0+KP_1+K^2R_2+K^3R_3+\cdots+K^nR_n \quad (n=1,2,\cdots,n) \quad (1)$$

式中:R_n——为滑坡暴发前 $n+1$ d 的逐日降雨量;K——一个衰减系数,通常取 0.8;n——滑坡发生前天数。前期有效降雨量对触发滑坡的作用随着时间的增长而减少,对于这 59 次滑坡来说,滑坡发生前 2 d的有效雨量平均 83%来自当日雨量,有效雨量的累积雨量日数为 3 d,可以说当日降雨量和滑坡之间有明显的相关关系,n 因此取 2。

当日雨量是指滑坡发生当天 24 h 降雨量,气象上是指前一天 20:00 到次日晚上 20:00 的 24 h 累积降雨量。而临界雨量是指导致斜坡稳定度改变的降雨量。

2　结果与分析

2.1　降雨特征分析

随着前期雨量渗入土壤中,改变斜坡的稳定度,减弱了滑坡体与土体之间的摩擦力,而在一定强度短时强降雨的作用下,斜坡的稳定度从量变发生质变从而激发滑坡发生。因此对不同地质灾害易发区滑坡前 2 d 至滑坡当天不同强度的短时强降雨历时进行统计(图 2)。

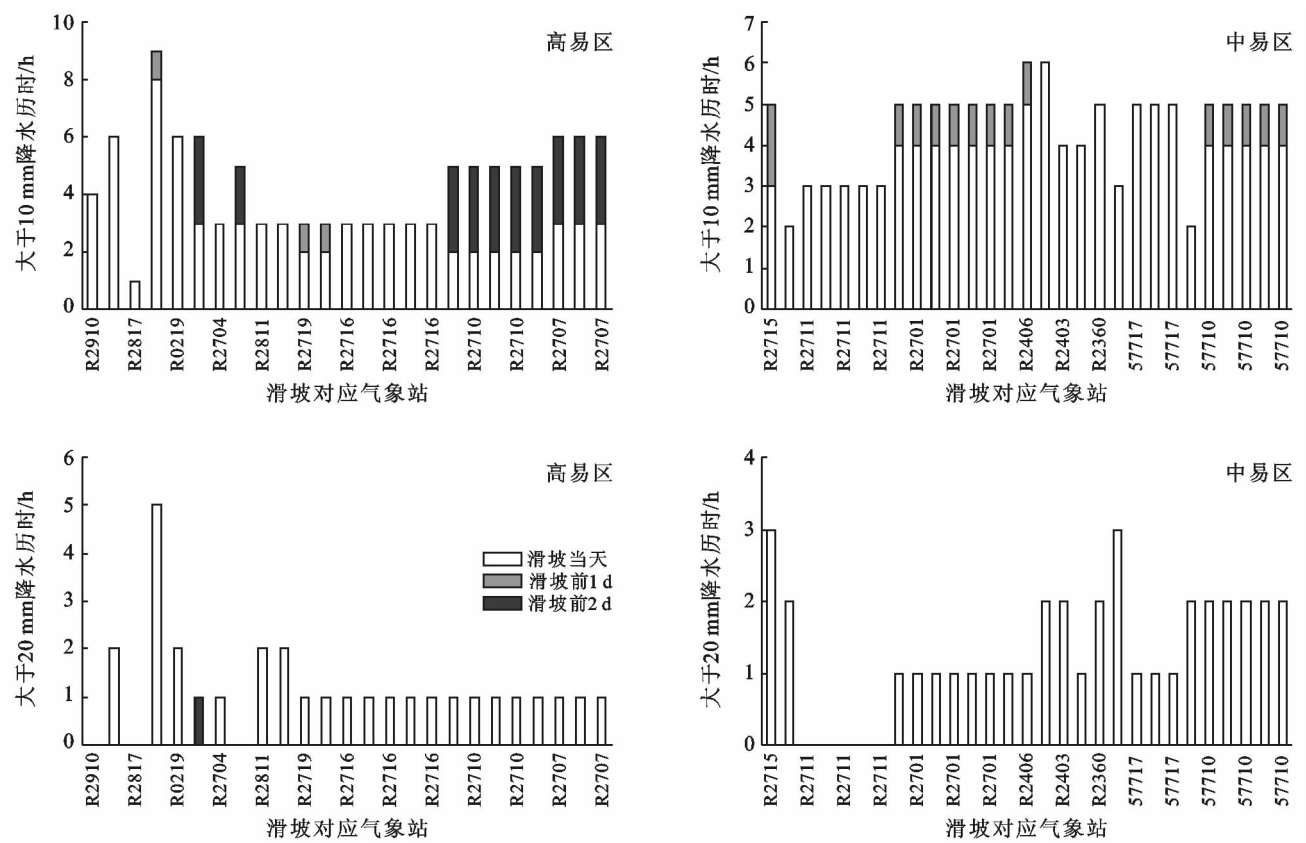


图 2　滑坡前 2 d 至滑坡当天不同降雨强度历时

统计结果显示:无论是高易区的滑坡还是中易区的滑坡,大于 10 和 20 mm/h 降雨绝大多数来自滑坡发生当天;位于高易区的滑坡,滑坡当天大于 10 mm/h 的降雨历时从 1～8 h 不等,平均 2.6 h,而位于中易区的滑坡,滑坡当天大于 10 mm/h 的降雨历时从 2～6 h 不等,平均 3.9 h;高易区滑坡当天大于 20 mm/h 的降雨历时从 0～5 h 不等,平均1.1 h,而中易区滑坡当天大于 20 mm/h 的降雨历时从 0～3 h 不等,平均

1.3 h。由此可见,无论是中易区还是高易区,小时雨量大于 10 mm 是遵义市地区滑坡的起报条件;无论是大于 20 mm/h 还是 10 mm/h 的降雨,中易区的降雨历时都长于高易区的降雨历时。

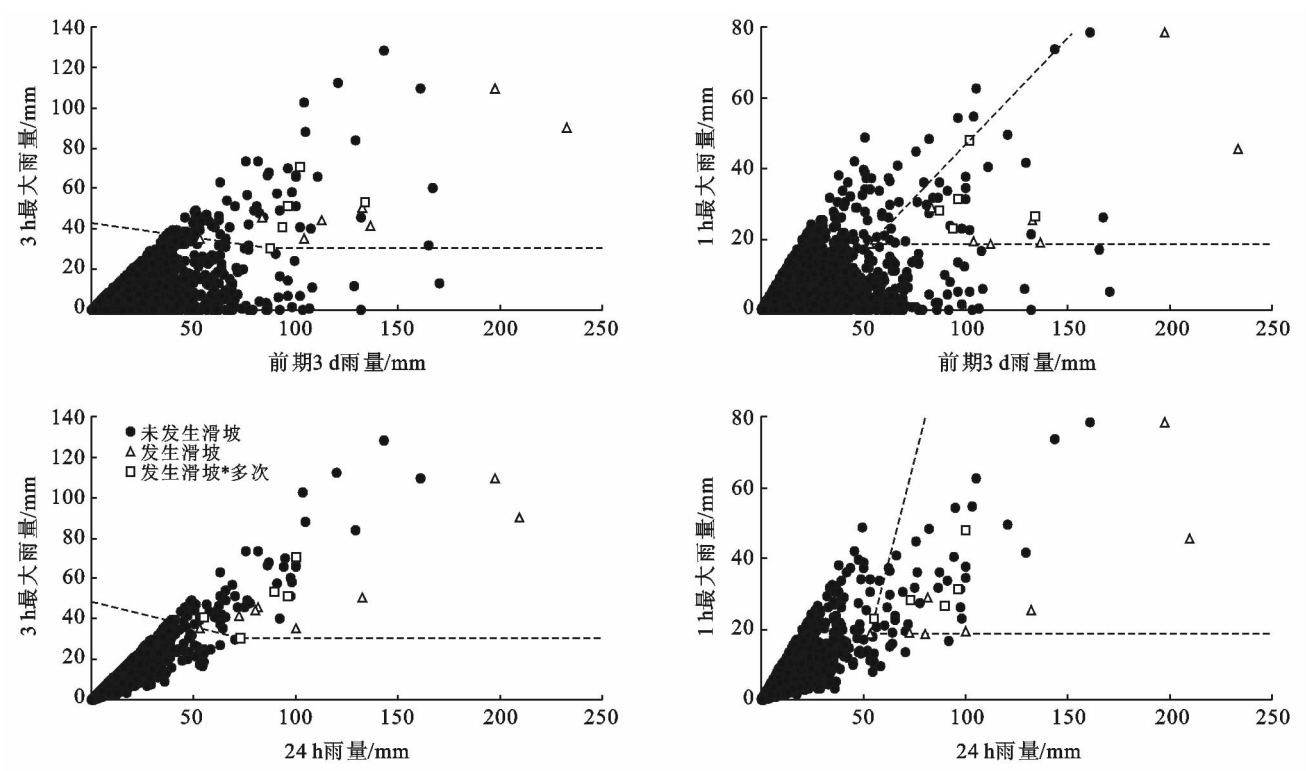
不同的降雨类型对激发滑坡的发生也有不同的影响,有研究表明[20-21],可将相同降雨总量的不同降雨类型按小时降雨量大小细分为平均型、中锋型、递增型和递减型 4 种类型。其中按照洪峰流量的大小来看,递减型最大,其次是递增型、中锋型,最小的是平均型,按照洪峰流量到达的时间来看,递增型最短,其次是中锋型和平均型,最长的是递减型,按照激发雨量阈值来看,递增型最大,其次是中锋型和平均型,最小的是递减型。根据这 4 种分类,分别统计高易区和中易区滑坡的降雨类型(表 2),从统计结果可以看出:无论是高易区还是中易区,中锋型所占比重最大,表明这是降雨的主要类型。高易区递减型比重大于中易区,这可能是因为递减型所需的激发雨量阈值最小,因此该类型的降雨易出现在高易区。

表 2 不同地质灾害易发区滑坡的降雨类型统计结果

降雨类型	平均型	中锋型	递增型	递减型
高易区	3	12	2	8
中易区	13	15	1	0

2.2 滑坡临界雨量阈值模型

研究表明[2],以滑坡当天、滑坡前 3 d 有效雨量(滑坡前期 2 d 至滑坡当天)与滑坡当天 1 h 最大雨量、3 h 最大雨量的 4 种不同组合来建立滑坡临界雨量预报模型,可确定出不同地质灾害易发区滑坡发生的激发雨量。具体方法是以滑坡当天或滑坡前 3 d 有效雨量为横坐标,以滑坡当天 1 h 最大雨量或 3 h 最大雨量作为纵坐标,将不同地质灾害易发区滑坡的雨量样本、未发生滑坡的雨量样本以点聚图的形式进行标注,根据点聚图的分布形势确定临界雨量判别线,将发生滑坡的样本与未发生滑坡的样本进行最大限度地区分开来,得到 4 种不同组合下临界雨量阈值(图 3—4)。



注:“*多次”表示发生滑坡数在两次或以上。下同。

图 3 高易区 4 种不同的雨量组合的阈值模型

假设临界雨量判别线以上发生滑坡和未发生滑坡样本均为预测样本,其中发生滑坡的样本为预测正确的样本,而未发生滑坡的样本为空报的样本即预测错误的样本。因此根据遵义市不同地质灾害易发区 4 种不同雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型,分别统计不同地质灾害易发区各预测模型中滑坡预测正确率(表 3)。从统计结果来看,对于高易区来说,滑坡当日 1 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率最大,且滑坡当日 1 h 最大雨量与滑坡当天 24 h 雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率也大于另外两种组合,因此可将滑坡当天 1 h 最大雨量作为遵义市地区高易区滑坡发生的激

发雨量。而对于中易区来说,滑坡当日 3 h 最大雨量与滑坡当天 24 h 雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率最大,且滑坡当日 3 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率也大于另外两种组合,因此可将滑坡当天 3 h 最大雨量作为遵义市地区中易区滑坡发生的激发雨量。

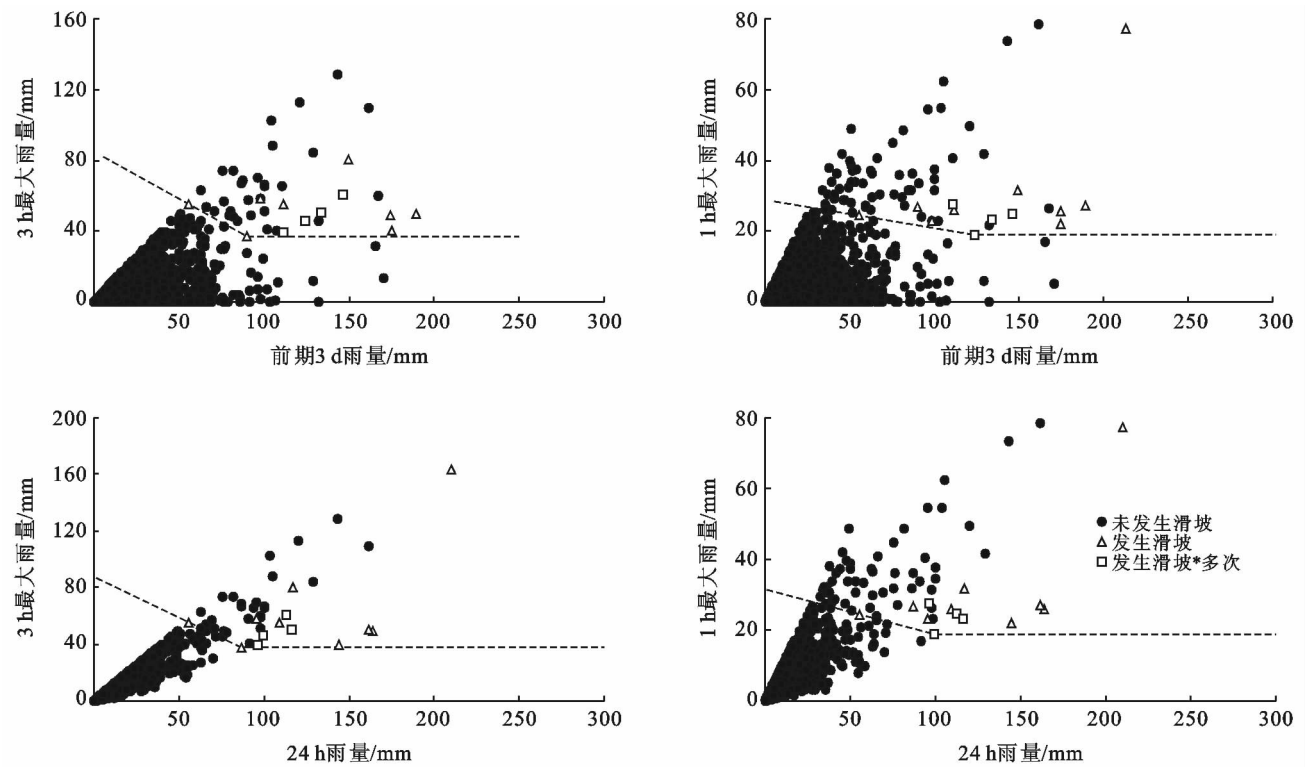


图 4　中易区 4 种不同的雨量组合的阈值模型

表 3　不同地质灾害易发区 4 种不同雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型的预报准确率

区 域	有效雨量与激发雨量组合			
	3 d 和 3 h_max	3 d 和 1 h_max	24 h 和 3 h_max	24 h 和 1 h_max
高易区	30.5	51.0	31.6	42.4
中易区	49.2	32.6	52.7	34.5

2.3　临界雨量阈值模型检验评估

利用不同地质灾害易发区 2015—2016 年的滑坡灾害样本和降雨对已经确定的滑坡临界雨量开展质量评估,由于降雨预报准确率会影响临界雨量的质量评估,因此,本质量评估不考虑预报因素,而是采用实际雨量监测值进行检验评估。针对已经确定的滑坡临界雨量模型开展检验评估,采用以下标准进行准确性的判定:①滑坡评估和实际发生情况不一致,则滑坡临界雨量不准确。②滑坡评估和实际一致,即发生滑坡,则滑坡临界雨量准确。表 1 给出了 2015—2016 年遵义市地区不同地质灾害易发区新增滑坡信息,根据滑坡发生时间,统计前期有效雨量和激发雨量,根据已经确定的滑坡临界雨量预测模型,评估滑坡是否发生。

从图 5 可以看出,2015—2016 新增滑坡点的前期 3 d 雨量(当日 24 h 雨量)与滑坡当天 3 h 最大雨量的点聚图均在滑坡判别线以内,表明该预测模型对这 4 次滑坡发生预测准确;而滑坡点的前期 3 d 雨量(当日 24 h 雨量)与滑坡当天 1 h 最大雨量的点聚图中有 2 个滑坡样本在滑坡判别线以内,2 个滑坡样本在滑坡判别线以外,表明表明该预测模型对这 4 次滑坡发生预测不够准确,因此需调整其滑坡判别线,使调整后的预测模型对这 4 次滑坡发生预测准确。与高易区类似,采用相同的方法评估中易区滑坡临界雨量阈值模型。从图 6 可以看出,2015—2016 新增滑坡点的前期 3 d 雨量(当日 24 h 雨量)与滑坡当天 3 h 最大雨量的点聚图在滑坡判别线以外,表明表明该预测模型对这次滑坡发生预测不够准确,同样需调整其滑坡判别线,使调整后的预测模型对这次滑坡发生预测准确;而滑坡点的前期 3 d 雨量(当日 24 h 雨量)与滑坡当天 1 h 最大雨量的点聚图中有 2 个滑坡样本在滑坡判别线以内,2 个滑坡样本在滑坡判别线以内,表明该预测模型对这次滑坡发生预测准确。与上一节相类似,分别统计不同地质灾害易发区调整后的各预测模型中滑坡预测正确率(表 4)。

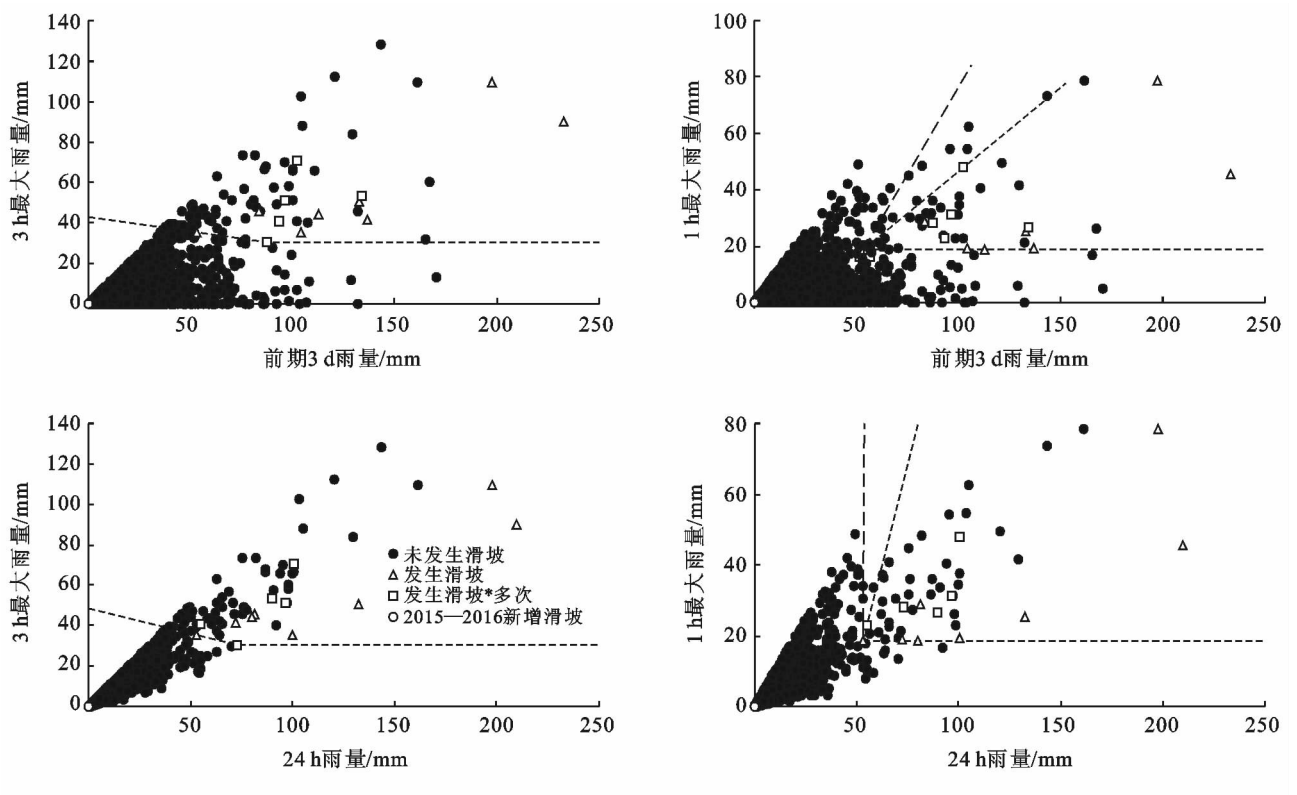


图 5 中易区 4 种不同的雨量组合的阈值模型

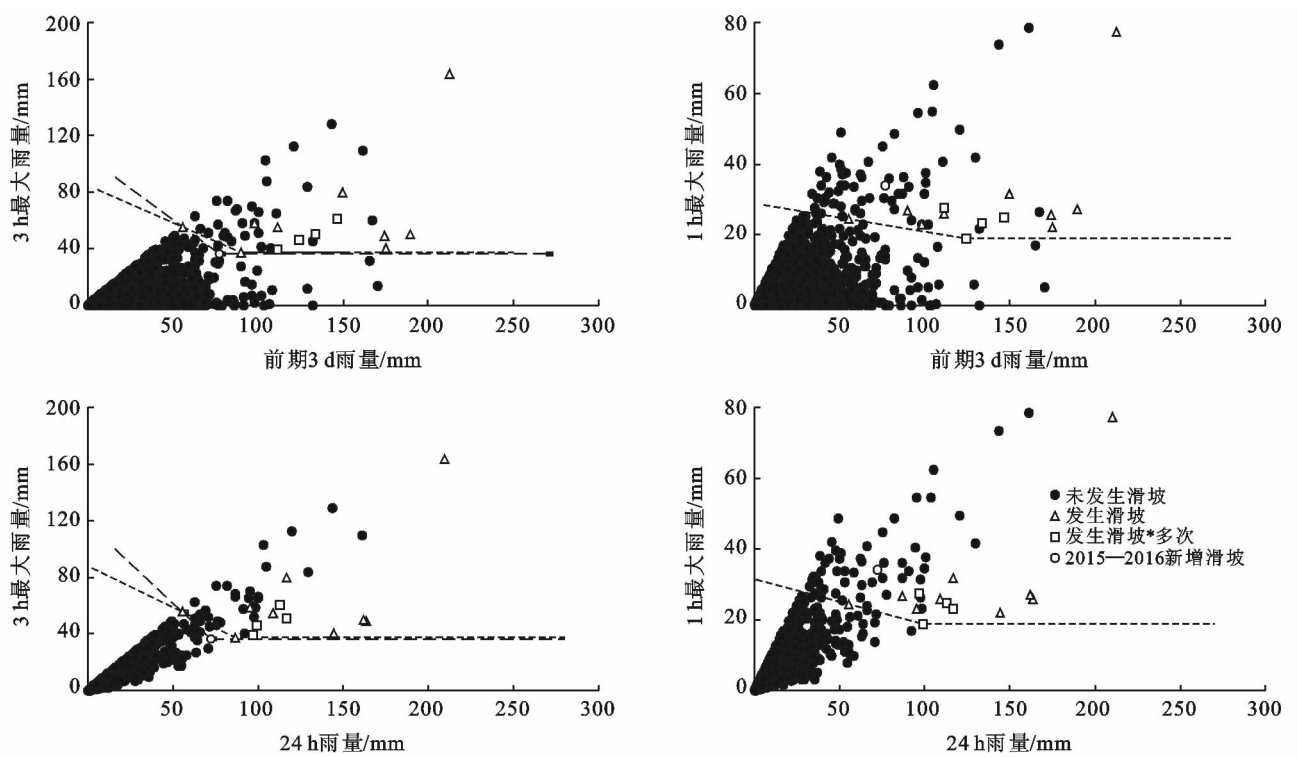


图 6 高易区 4 种不同的雨量组合的阈值模型检验评估

从统计结果来看,不同地质灾害易发区调整后的预测模型其准确率均有所变化;对于高易区来说,虽然调整后的滑坡当日 1 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合滑坡临界雨量阈值模型预报准确率有所下降,但该滑坡临界雨量阈值模型预报准确率依旧最大,且滑坡当日 1 h 最大雨量与滑坡当天 24 h 雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率也大于另外两种组合,因此仍将滑坡当天 1 h 最大雨量作为遵义市地区高易区滑坡发生的激发雨量。而对于中易区来说,滑坡当日 3 h 最大雨量与滑坡当天 24 h 雨量组

合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率也有所下降,但依旧最大,且滑坡当日 3 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率也大于另外 2 种组合,因此仍将滑坡当天 3 h 最大雨量作为遵义市地区中易区滑坡发生的激发雨量。

表 4　调整后的预测模型的预报准确率

区域	有效雨量与激发雨量组合			
	3 d 和 3 h_max	3 d 和 1 h_max	24 h 和 3 h_max	24 h 和 1 h_max
高易区	33.7	45.3	34.9	44.6
中易区	49.2	33.3	50.8	35.3

3　讨论与结论

(1) 无论是高易区的滑坡还是中易区的滑坡,大于 10 和 20 mm/h 降雨绝大多数来自滑坡发生当天,但中易区大于 20 和 10 mm/h 降雨历时均长于高易区的降雨历时。

(2) 无论是高易区还是中易区,中锋型所占比重最大,表明这是降雨的主要类型。高易区递减型比重大于中易区,这可能是因为递减型所需的激发雨量阈值最小,因此该类型的降雨易出现在高易区。

(3) 对于高易区来说,滑坡当日 1 h 最大雨量与前期 3 d 的有效雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率最大,可将滑坡当天 1 h 最大雨量作为遵义市地区高易区滑坡发生的激发雨量。而对于中易区来说,滑坡当日 3 h 最大雨量与滑坡当天 24 h 雨量组合的滑坡临界雨量阈值模型预报准确率最大,可将滑坡当天 3 h 最大雨量作为遵义市地区中易区滑坡发生的激发雨量。

(4) 根据新增滑坡信息对已经确定的滑坡临界雨量预测模型进行检验评估,如果预测模型对新增滑坡预测不准确,需调整其滑坡判别线,使调整后的预测模型对这次滑坡发生预测准确。统计调整后的各预测模型中滑坡预测正确率发现滑坡当天 1 h 最大雨量仍为遵义市地区高易区滑坡发生的激发雨量,而滑坡当天 3 h 最大雨量仍为遵义市地区中易区滑坡发生的激发雨量。

(5) 由于区域气象站分布的空间分辨率不高,加之地质灾害发生时间不够精确,因此在后期中需要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] 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] 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.

[3] 赵衡,宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,5(41):1481-1487.

[4] Guzztti F, Peruccacci S, Rossi M. Risk-advanced weather prediction system to advise on risk events and management: Definition of critical threshold for different scenarios[R]. Action, 2005,1(16):28-30.

[5] Wilson R C, Wieczorek G F. Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1995,1(1):11-27.

[6] Crosta G B, Frattini P. Distrtbuted modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003,3(1/2):81-93.

[7] 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.

[8] Guzztti 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(3/4):239-267.

[9] Guzztti 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.

[10] Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resource Research, 2000,36(7):1897-1910.

[11] 陈洪凯,魏来,谭玲. 降雨型滑坡经验性降水阈值研究综述. 重庆交通大学学报:自然科学版 [J]. 2012,31(5):990-996.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 刘海知,马振峰,范广洲. 四川省典型区域滑坡、泥石流致灾临界雨量阈值确定方法[J]. 水土保持通报,2017,37(4):126-131,224.

[15] 李秀珍,张小红. 基于 Mein-Larson 入渗模型的降雨滑坡失稳破坏概率研究[J]. 水土保持通报,2017,37(1):219-223.

[16] 崔鹏,杨坤,陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献:以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学,2003,1(1):11-15.

[17] 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.

(下转第 239 页)

[15] 刘伟,刘祥宏,但新球,等.生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以贵州北盘江大峡谷国家湿地公园为例[J].草地学报,2015,23(4):689-696.

[16] 侯鹏,王桥,王昌佐,等.流域土地利用/土地覆被变化的生态效应[J].地理研究,2011,30(11):2092-2098.

[17] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

[18] Bian Zhengfu, Lu Qingqing. Ecological effects analysis of land use change in coal mining areabased on ecosystem service valuing: A case study in Jiawang[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(6):1619-1630.

[19] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.

[20] 赵国梁,胡业翠.基于 CLUE-S 模型的广西喀斯特山区生态系统服务价值变化研究[J].水土保持研究,2014,21(6):198-203.

[21] Liu Guang, Jin Qingwen, Li Jingyi, et al. Policy factors impact analysis based on remote sensing data and the CLUE-S model in the Lijiang River Basin, China [J]. Catena, 2017,158(11):286-297.

[22] Zhang Liping, Zhang Shiwen, Zhou Zhiming, et al. Spatial distribution prediction and benefits assessment of green manure in the Pinggu District, Beijing, based on the CLUE-S model[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016,15(2):465-474.

[23] 张永民,赵士洞, Verburg P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J].自然资源学报,2003,18(3):310-318.

[24] 郭洪伟,孙小银,廉丽姝,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2016,27(9):2899-2906.

[25] 黄明,张学霞,张建军,等.基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J].资源科学,2012,34(4):769-776.

[26] R Gil Pontius Jr, Laura C. Schneider. land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 85(1/3): 239-248.

[27] R Gil Pontius Jr. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000,66(8):1011-1016.

[28] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[29] 于森,吕晓,廉丽姝,等.江苏省沿海地区土地利用变化及其生态效应[J].水土保持通报,2017,37(3):131-139.

(上接第 223 页)

[18] 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.

[19] 李云君,刘志红,吕远洋,等.四川省滑坡灾害气象预警模型建立与验证[J].地球信息科学学报,2017,19(7):941-949.

[20] Tsai Tunglin. The influence of rainfall pattern on shallow land-slide[J]. Environmental Geology, 2007,53(7):1563-1569.

[21] Lima J L M P de, Singh V P. The influence of rainfall pattern of moving rainstorms on overland flow. [J]. Advances in Water Resources, 2002,25(7):817-828.

(上接第 230 页)

[22] Pautler B G, Sanborn P T, Simpson A J, et al. Molecular characterization of organic matter in Canadian Arctic paleosols for paleoecological applications[J]. Organic Geochemistry, 2013,63(5):122-138.

[23] Carmignato S, Dewulf W, Leach R. Industrial X-ray computed tomography [M]. Cham, Switzerland: Springer, International Publishing, 2018.

[24] FEI, SAS. Avizo9 User's Guide[M]. Berlin, Germany: FEI,2016.

[25] 王玉灵.基于双边滤波的图像处理算法研究[D].陕西西安:西安电子科技大学,2010.

[26] 王浩宇.基于工业 CT 断层切片数据的逆向设计优化技术研究[D].重庆:重庆大学;2016.

[27] 中国国家标准化管理委员会.GB/T21650.1-2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度:第 1 部分(压汞法)[S].北京:中国标准出版社,2008.

[28] 徐芹选,赵景波,祁晓丽.黄土孔隙度及粒度组成关系初探[J].西安工程学院学报,2000,22(1):67-70.