

沈军,方琼,吴贤云,等,2017. 湖南古丈山体滑坡影响因子分析[J]. 气象,43(11):1410-1419.

湖南古丈山体滑坡影响因子分析*

沈 军^{1,2} 方 琼³ 吴贤云⁴ 曹思沁⁵

1 湖南气象技术装备中心,长沙 410007

2 湖南省气象灾害省重点实验室,长沙 410118

3 湖南省地质环境监测总站,长沙 410007

4 湖南省气候中心,长沙 410118

5 湖南省气象局,长沙 410118

提 要: 为研究湖南省古丈县 2016 年 7 月 17 日群体滑坡的地质环境与降水诱发成因,基于 GIS 空间分析平台,利用古丈县 1:5 万地质灾害详查资料、地形地貌、公路河网、坡度坡向、地下水类型、滑坡体与岩土产状关系等空间数据,分析古丈县多种地质环境因子与滑坡事件的影响系数;采用贝叶斯后验概率分析法确定古丈滑坡降水阈值曲线(I-D 曲线);基于多要素地质环境因子、临界降水条件及滑坡触发有效雨量综合分析了本次群体滑坡事件的主要成因。结果表明:出现大于当地滑坡阈值的极端降水事件(一定的滑坡降水强度、持续时间和滑坡触发有效雨量)是诱发古丈群体滑坡的主要外源动力,脆弱的岩土结构、滑坡体与岩层产状一致的滑坡类型、公路(铁路)和河网修建对山体切坡的影响、敏感的坡度区间、高风险的坡向区间等地质因子是导致古丈默戎“7·17”滑坡的地质成因,相关研究方法和结论对该地区未来地质灾害预警预报提供了方法和数据支持。

关键词: 滑坡,地质灾害,I-D 曲线,降水临界条件,贝叶斯统计分析

中图分类号: P203,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.010

Analysis of Impact Factor of Landslide in Guzhang County of Hunan Province

SHEN Jun^{1,2} FANG Qiong³ WU Xianyun⁴ CAO Siqin⁵

1 Meteorological Technology Equipment Center of Hunan, Changsha 410007

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Disaster Prevention in Hunan Province, Changsha 410118

3 Geological Environmental Monitoring Station of Hunan Province, Changsha 410007

4 Hunan Climate Centre, Changsha 410118

5 Hunan Meteorological Service, Changsha 410118

Abstract: This paper analyzes the factors which led to landslide in Guzhang of Hunan Province on 17 July 2016. Based on the GIS space analysis tools, all geological factors contributing to the Guzhang landslide are analyzed by using the geological disaster investigation data with scale of 1:50000, distribution of road and railway as well as the net of small rivers, river banks and aspect of landslides. Using the module of Bayesian inference, and Gibbs Sampling (BUGS), the parameters of I-D curves are estimated, and the effective rainfall which led to the landslides of Guzhang area is studied. Combining the previous disaster investigation of Guzhang landslides with the analysis result, we get a detailed cause of Guzhang landslides, which is helpful in warning landslides there in future. The analysis about the landslide factor of Guzhang landslide shows us that the extremely heavy rains are the main cause for the landslides, the badly cutting

* 国家自然科学基金项目(41305056)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB955901)共同资助

2016 年 8 月 14 日收稿; 2017 年 7 月 30 日收修定稿

第一作者:沈军,主要从事数据处理、灾害风险区划和气候影响评价研究. Email:vafj5@163.com

slope condition caused by traffic construction, sensitive slope interval and the high risk of the aspect to the landslide are also the key factors for the 17 July landslide at Morong of Guzhang. The research methods and findings are conducive to the future warning of geological disasters.

Key words: landslide, geological disaster, I-D curve, critical rainfall, Bayesian inference

引 言

受地质环境变化、人类活动和暴雨诱发影响,滑坡和泥石流灾害常常给人民带来巨大的生命和财产损失,是当前自然灾害中致灾频率最高、损失最大和影响范围较广的气象灾害之一。受矿山开发、公路、铁路和水库的修建及强对流天气等因素的影响,自 2000 年以来,湖南省共发生各类滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等地质灾害 140012 起,其中滑坡相关的地质灾害占 8 成以上。滑坡地质灾害由于致灾速度快、随机性强、灾后救援困难等特性使得该类灾害的风险管理研究受到国内外政府和相关专家的关注。当前滑坡灾害研究主要关注于以下几个方面:地质成因与滑坡机理研究(郭芳芳等,2008)、滑坡灾害危险性研究(乔建平和赵宇,2001;樊晓一和乔建平,2004;田述军和孔纪名,2013)、滑坡诱发的致灾因子及其影响研究(王钧等,2013)和滑坡预测预报(马力等,2008)研究等。近年来,滑坡致灾因子及其影响的研究受到了越来越多学者的关注,如在公路滑坡领域,Jaafari et al (2015)基于 ArcView 的 Pegger 工具构建了山区公路滑坡脆弱性区划;黄达等(2008)以一次公路滑坡为案例,对公路滑坡的变形特征、成因机制及稳定性进行了详细分析并最终认为山区公路网修建之首要条件是控制边坡稳定性;在河网滑坡敏感性因子研究方面,赵建华等(2006)基于单变量评价方法对水系距离与滑坡点的百分比进行了分类,建立了有效的滑坡敏感性指标;在山区坡度滑坡风险领域,乔建平等(2007)研究了三峡库区斜坡坡度对滑坡发育的影响,并且定量给出了坡度对滑坡发育的贡献;地下水类型与流量也是导致不稳定性滑坡的因子之一,谭超(2009)系统性论述了地下水产生山体滑坡的物理、化学基本过程,并着重分析了地下水类型和流量对滑坡的影响;在滑坡体与岩层产状一致性的关系领域,柴波和殷坤龙(2009)研究了不同岩质顺向坡岩层倾向和坡向夹角变化对斜坡稳定性影响的敏感程度,量化分析了三峡库区库首至巴东段岩层倾向和坡向夹角极限值。

古丈县位于湖南武陵山区中东部,属于中国东部新华夏系构造第三隆起带中段和古丈—凤凰新华夏亚带。受喜山运动和第四系新构造的影响以及古丈平原的抬升,该地褶皱断裂较为发育,构造线走向主要呈北—北东展布,根据岩石成因区域内岩体工程地质类型可划分为浅变质岩建造、沉积碳酸盐岩建造和沉积碎屑岩建造三个主要类型。

古丈县年平均降水量 1401.2 mm,降水集中在 5—8 月。近年来,受气候变化的影响,古丈县区域极端降水事件频现,从而导致山洪地质灾害事件增多,2016 年 7 月 17 日,受副热带高压边缘并配合中低层切变线影响,湘西大部分地区出现强降雨过程,根据湖南极端降水监测系统显示,古丈县及周边地区如吉首市、保靖、泸溪、沅陵以及凤凰县均出现了极端降水事件,其中吉首市日降水量达到 200.4 mm,连续 5 d 累计降水量为 451.0 mm,突破连续 2、3 和 5 d 的累计降水历史极值;凤凰县日降水量为 251.7 mm,该站 1~4 d 最大降水量及 5 d 总降水量均突破历史极值;沅陵县 2、3 和 4 d 最大及 5 d 总降水量达到极端降水事件条件;古丈县默戎镇日降水量为 203.3 mm,最大小时降水量为 104.9 mm,均突破当地历史极值(日极值:110 mm·d⁻¹,降水强度极值:30 mm·h⁻¹);较强的极端降水过程,尤其是超过 100 年一遇的短时强降水过程导致湘西出现了大面积的山洪地质灾害和中小河流洪水灾害。

以 GIS 为平台,本文将地质灾害相关因子与滑坡样本进行空间分析,研究古丈不同地质环境因子对滑坡的贡献率,研究古丈降水诱发滑坡事件中,诱发滑坡的降水因子(如强降水持续时间、降水强度、触发滑坡的有效降水量等)的临界条件。利用贝叶斯后验概率模型分析古丈滑坡阈值曲线(降水强度-持续时间模型, I-D 模型)。基于以上研究结果,利用综合因子分析法评估古丈“7·17”群体滑坡过程的气象条件和地质条件,从而系统解释了古丈“7·17”群体滑坡出现的成因。相关方法和研究成果对该地气象灾害预警服务提供可靠的方法与数据支持。

1 资料与方法

本研究所用的资料以中国气象局的“暴雨洪涝灾害风险普查”数据库为主要数据来源,涉及到湖南 1:5 万公路矢量数据、湖南 1:5 万水系河网资料、岩土工程 1:250 万工程资料、1:5 万数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、1:20 万水文地质图、湖南省气象观测区域站网实况降水观测资料、湖南气候观测 30 年整编资料(降水部分),以及由湖南省地质灾害应急中心提供的湘西州古丈、花垣、永顺、吉首 1981—2015 年的地质灾害详查(1:5 万)数据。

根据滑坡事件出现的内因条件和外因动力条件,本文从地质环境对滑坡的影响及降水诱发滑坡两个方面开展研究,采用的方法主要包括地质环境因子分析法、降水强度-持续时间(I-D)分析法以及滑坡前期有效降水量分析法。

地质环境因子分析法:利用 GIS 分析平台,将古丈县公路(铁路)、水系、DEM 数据、岩土数据、岩土产状和历史滑坡点进行空间叠加,计算每个滑坡点到公路(铁路)、水系的最短距离,提取每个滑坡点与地图对应的坡向和坡度,分析每个滑坡点对应的岩土结构类型和地下水性质,基于滑坡样本点和地质水文数据,计算每个滑坡点坡向与岩土产状倾向的一致性。结合历史滑坡样本资料,分析各滑坡因子产生滑坡的统计特性,并构建合理的区间划分并计算各因子滑坡贡献率。

I-D 分析法:利用降水诱发滑坡研究领域较为成熟的 I-D 分析方法,结合古丈县及相邻区域有效历史滑坡样本和同步降水观测资料,构建古丈县滑坡相关的 I-D 模型,并利用贝叶斯后验概率方法开展模型的最优参数估计,定量化计算古丈县气象水文条件下多时间尺度的降水-滑坡临界条件。

滑坡前期有效降水量分析:利用前期降雨指数(antecedent precipitation index, API)模型(Kohler and Linsley, 1951)研究古丈县降雨型滑坡过程中,前期持续降水对滑坡的影响,分析不同持续降水时间条件下产生滑坡的有效触发雨量。API 模型为:

$$P_{0n} = \sum_{i=0}^n k^i R_{0i} \quad (1)$$

式中, P_{0n} 为第 0~n 日的累计有效降水量; R_{0i} 为相对第 0 天对应的第 i 日日降水量,k 为衰减系数。

利用古丈县降水诱发滑坡临界条件和滑坡有效触发雨量研究结果,分析“7·17”古丈默戎镇群体性滑坡事件中实况降水诱发滑坡的概率,并综合分析多要素地质环境因子、降水条件、有效雨量对该地产生滑坡的概率,找出“7·17”古丈群体滑坡的主要成因。

2 古丈地质环境滑坡相关因子分析

2.1 古丈县公路、铁路对滑坡的影响

古丈县为典型的喀斯特地貌,公路、铁路以及高速公路等交通工程的修建与维护涉及的山体开坡工程量大,从而导致边坡失稳的滑坡灾害风险增加。基于 GIS 空间分析平台,本文将湘西古丈县公路交通网、铁路线路及历史滑坡样本点进行空间叠加(图 1),计算出各滑坡样本点到交通路网的最短距离,并对最短距离数据集进行聚类分析(聚类距离为 25 m)(图 2)。

图 2 为湘西古丈滑坡样本点到公路、铁路的最短距离统计分布图,可以明显看出:公路、铁路网络的维护与修建工程对山区滑坡有较大的影响,表现为“距公路距离越小,滑坡出现的概率越大”,如公路两边 50 m 以内滑坡占总样本的 43.3%,75 m 范围以内出现的滑坡为 62.1%,而在 200 m 以外范围出现的滑坡仅为 7.4%。因此,公路两边 50 m 距离范围为公路滑坡的敏感区域。

2.2 古丈县河道水系对滑坡的影响

基于滑坡样本点至山洪沟等河网的最近距离数据集,本文对滑坡点至水系距离进行分类统计。根据湖南省暴雨洪涝风险普查系统数据显示,古丈县内主要河流有丹青河、古阳河、草塘河和酉溪河等中小河流和山洪沟(5 级以上自然河流)共 699 条,将收集的历史滑坡点与河网数据叠加得到图 3 分布结果,对图 3 中的滑坡样本点计算得到最近河道的距离,并按 50 m 间距进行统计分类,得到图 4 结果。

图 4 说明了在古丈县内滑坡事件的发生与山洪沟和河道有一定的关系,水流的冲刷和水利设施的维护对堤防和山体切坡均有较大的影响,随着滑坡样本点距河道距离越小,滑坡的概率越大,尤其是在河道两边 300 m 内,滑坡案例占样本总数的 51.3%,当河道距离 500 m 以外出现滑坡的概率为

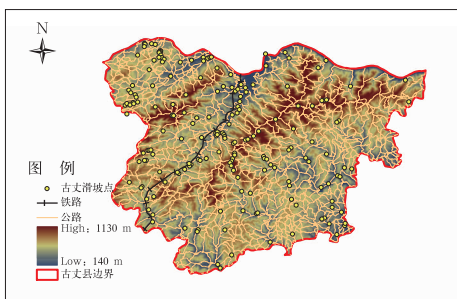


图 1 古丈滑坡点-公路(铁路)分布图
Fig. 1 Distribution of and roads/railways in Guzhang landslide area

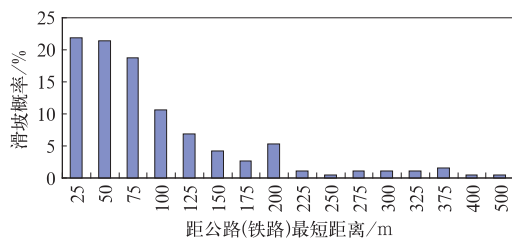


图 2 古丈滑坡点至公路最短距离滑坡概率分布
Fig. 2 The percentage of minimum-distance between sample and roads/railways in Guzhang landslide area

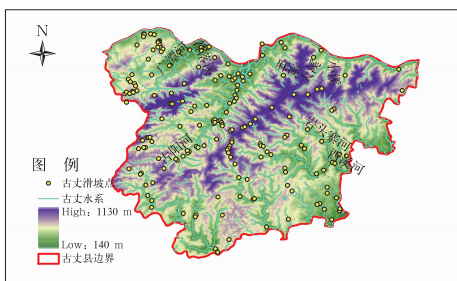


图 3 古丈滑坡点-河网分布图
Fig. 3 Distribution of rivers in Guzhang landslide area

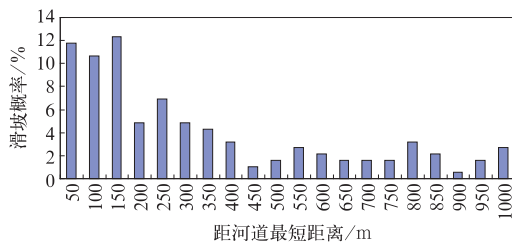


图 4 古丈滑坡点至河网最短距离的滑坡概率分布
Fig. 4 The percentage of minimum-distance between bank and sample in Guzhang landslide area

42.1%,河道距离在 1000 m 以外时,出现的滑坡比率仅为 12.8%。

2.3 古丈县坡度对滑坡的影响

一定的坡度是滑坡产生的必要条件,古丈县地形复杂,地表以林木覆盖为主,坡度变化幅度大,将古丈滑坡调查样本数据和坡度数据进行叠加,得到每个滑坡样本对应的滑坡坡度值(图 5),对坡度数据按 5°为一个间距进行聚类分析,得到每个区间下的坡度样本统计图(图 6)。

图 6 说明古丈山体滑坡坡度主要集中在 $\angle 10^{\circ} \sim 30^{\circ}$,滑坡概率为 76.4%,其中, $\angle 10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 滑坡出现的概率占 27.8%,因而该山体坡度区域为古丈滑坡的敏感坡度区域。

2.4 古丈县坡向对滑坡的影响

古丈为典型的山区,中低山面积占行政面积 70%,同时也是滑坡灾害的高发区,然而,受迎风坡等气候、地质条件的影响,中低山不同的坡向对应不同的降水强度和不同的滑坡风险。为分析不同坡面对滑坡的影响,将坡向因子划分为若干区间,计算古丈县每一坡向区间对滑坡的贡献率,定量地分析坡向区间变化与滑坡发育的关系。将滑坡样本与滑坡

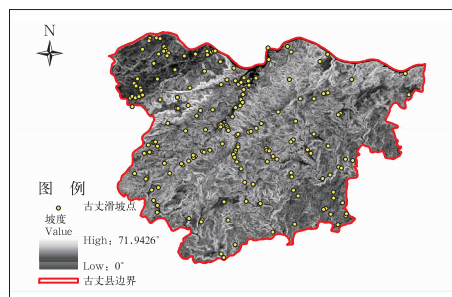


图 5 古丈滑坡点-坡度分布图
Fig. 5 Slopes in Guzhang landslide area

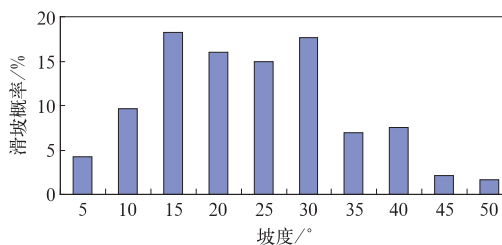


图 6 古丈滑坡与坡度的概率分布
Fig. 6 The percentage of slope in Guzhang landslide area

坡向地形图(1:5万)叠加,得到图7结果。

对图7的滑坡坡向进行区间分析,以正北方向为0°,按照逆时针方向且30°为间隔进行区域划分,并基于区域样本统计百分率,得到图8结果。可以明显看出,古丈县坡向滑坡敏感区间为300~360°,对应的概率为10%~16.06%,其中滑坡影响最大值为330°。

2.5 古丈县岩土结构对滑坡的影响

岩土是产生滑坡和泥石流的物质载体。岩土类型、岩土性质及岩土构造等结构特征对滑坡和泥石流的发育过程影响较大,是产生滑坡和泥石流灾害的重要内因之一;将古丈县的岩土构造特征和滑坡样本叠加,分析古丈县滑坡样本对应的岩土类型(图9)。

表1为古丈县主要岩土类型与代码,图10表示了岩土代码与滑坡几率分布,该图说明了古丈地区沉积碎屑岩特性的坚硬至软弱薄层-厚层状硅质岩夹页岩岩组有较高的滑坡概率(43.13%),坚硬至较

坚硬薄层-层块状碳酸盐岩岩组的碳酸盐类岩土占滑坡的25.6%,相比之下,坚硬至较坚硬薄层-层块状碳酸盐岩岩组发生滑坡的概率最小(0.53%)。因

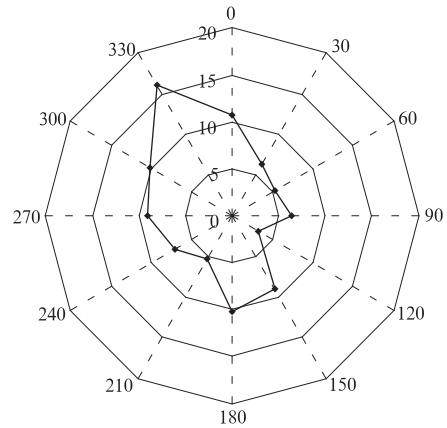


图8 古丈滑坡的坡向概率分布
Fig.8 The probability of aspect in Guzhang landslide area

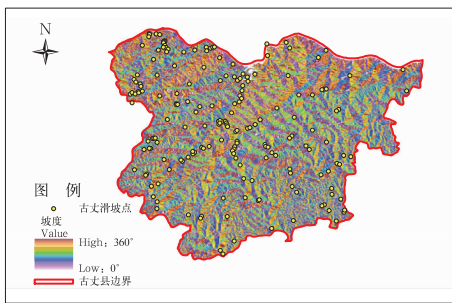


图7 古丈滑坡点-坡向分布图
Fig.7 Distribution of aspect of Guzhang landslide area

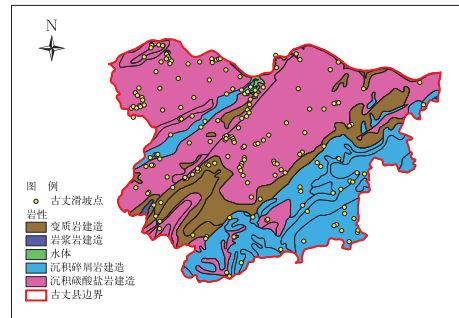


图9 古丈滑坡点-岩性类型分布图
Fig.9 Distribution of geology of Guzhang landslide area

表1 岩土代码、岩性及岩土组类型
Table 1 The code property and type of geology

岩土代码	岩性	岩组
431189	沉积碳酸盐岩建造	坚硬至较坚硬薄层-层块状碳酸盐岩岩组
431653	沉积碎屑岩建造	坚硬至软弱薄层-厚层状硅质岩夹页岩岩组
431654	变质岩建造	坚硬至较坚硬薄层-层块状板岩浅变质砂岩夹火山碎屑岩岩组
431686	沉积碎屑岩建造	坚硬至软弱薄层-厚层状硅质岩夹页岩岩组
431687	沉积碎屑岩建造	软硬相间薄层-层块状砂砾岩与泥(页)岩互层岩组
431688	沉积碎屑岩建造	软弱薄层状泥(页)岩岩组
431725	变质岩建造	软弱至较坚硬薄层-厚层状板岩岩组
431733	沉积碎屑岩建造	坚硬至较坚硬薄层-层块状砂岩岩组
431736	沉积碎屑岩建造	软弱薄层状泥(页)岩岩组
431771	沉积碳酸盐岩建造	坚硬至软弱薄层-层块状碳酸盐岩与碎屑岩互层岩组
431772	沉积碳酸盐岩建造	坚硬至较坚硬薄层-层块状碳酸盐岩岩组
431778	沉积碎屑岩建造	软硬相间薄层-层块状砂砾岩与泥(页)岩互层岩组
431807	沉积碎屑岩建造	坚硬至软弱薄层-厚层状硅质岩夹页岩岩组
431931	沉积碳酸盐岩建造	坚硬至较坚硬薄层-层块状碳酸盐岩岩组

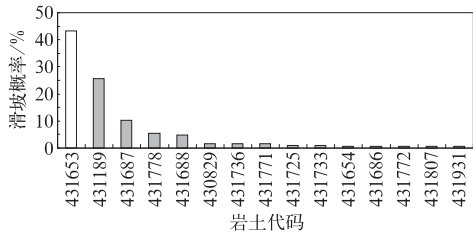


图 10 岩组代码及滑坡的概率分布
Fig. 10 Landslide rate of geology in Guzhang area

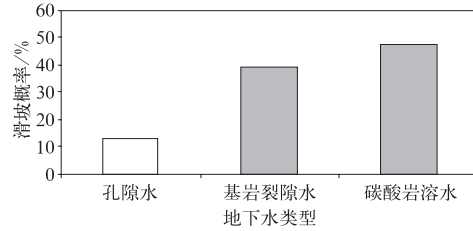


图 11 古丈地下水类型-滑坡的概率分布
Fig. 11 The landslide rate of groundwater of Guzhang area

此,从岩土类型对滑坡的影响率来看,硅质岩夹页岩岩组和碳酸盐类岩土组为滑坡的敏感岩土类型。

2.6 古丈县地下水分布对滑坡的影响

在降水地表径流过程中,连阴雨天气常常意味着地表径流量远小于地表渗流,从而导致地下水位上涨,基于物理作用和岩土化学作用,地下水容易导致滑坡带出现“长时间、小雨量”的降水诱发滑坡现象,尤其是对松散土质滑坡区域,孔隙水压力和流量对滑坡影响较大(魏丽等,2005)。因此,有必要分析不同地下水类型对滑坡的贡献率。古丈县地下水主要为松散堆积层孔隙水、红层孔隙裂隙水和碳酸盐岩岩溶水四大类。图 11 为地下水类型分布与滑坡样本叠加得到的分类图,孔隙水对滑坡的影响较少而碳酸岩溶水导致滑坡所占比例较大。

2.7 古丈县岩土产状分布对滑坡的影响

岩层在空间的走向、倾向和倾角可以用岩层产状概念表述。在滑坡事件发生过程中,滑坡频率与滑体规模受滑坡体与基岩倾向和倾角的一致性关系的影响而各异。本文基于湘西古丈、花垣、保靖、吉首 4 个县 1:5 万地质灾害调查数据为观测样本,开展基岩滑坡产状定性分析,相关结果见图 12 所示。

图 12 说明在古丈县滑坡样本与岩层产状关系分类中,斜向滑坡和顺向滑坡占滑坡较大的比例。其中斜向滑坡中斜坡占 37.05%且滑坡以松散土质滑坡为主,该类滑坡不能有效反映滑坡基岩与滑坡体的关系;顺向滑坡为滑坡体与基岩倾向一致的滑坡,是岩质滑坡种类中稳定性最差,最易变形的滑坡类型(柴波和殷坤龙,2009),该类滑坡占湘西地区滑坡种类的第二大值(28.56%)。以上统计说明,在产状与滑坡点地表坡向关系中,顺向滑坡仍是古丈县滑坡主要的类型。

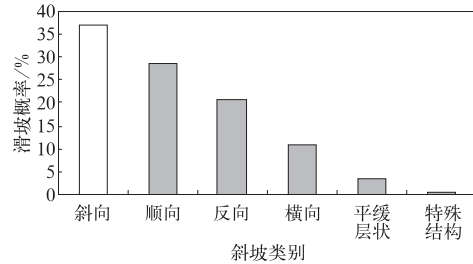


图 12 古丈地区滑坡基岩产状、滑坡面类型与滑坡概率
Fig. 12 The slope of landslide and station of Guzhang area

3 滑坡降水条件分析

3.1 基于 I-D 分析法区域小时降水强度滑坡分析

针对浅层滑坡与泥石流事件中降水强度和持续时间的问题,Caine(1980)提出了降水强度-持续时间模型(I-D 模型)并研究了全球 73 个地区诱发浅层滑坡和泥石流事件中降水强度和持续时间关系。此后,I-D 指数模型是降水诱发滑坡研究中较成熟且应用较为广泛的模型。

$$I = \alpha D^{-\beta} \quad (2)$$

式中, I 为小时级的降水强度,单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; D 为持续降水时间,单位为 h , α 和 β 分别为待估参数。

基于 2010—2016 年,古丈县及相邻区域 66 个有效降雨型滑坡案例样本、同步降水观测资料以及贝叶斯后验概率最优参数估计法(Chen et al,2005; Brunetti et al,2010)对式(2)进行参数估计。

定义一个测度函数:

$$\begin{aligned} z(I, D) &= \frac{[I - \alpha D^{-\beta}]}{I} \\ &= 1 - \frac{\alpha D^{-\beta}}{I} \end{aligned} \quad (3)$$

基于指数函数[式(3)],构建一个降水强度(I)和持续时间(D)的二维函数 $P(I, D)$ 。为不失一般性,假定 $P(I, D)$ 服从以概率函数 $\mu(I, D)$ 为参数的伯努利分布(Bernoulli distribution), 即有:

$$P(I, D) \approx dbern[u(I, D)]$$

且满足:

$$\mu(I, D) = \{(1 - \delta)\theta[z(I, D)] + \delta\} \times \exp[-\eta | z(I, D) |]$$

式中, $\theta[z(I, D)]$ 为与函数 $z(I, D)$ 相关的符号函数, δ 和 η 分别为 I-D 空间域的变量空间。

为提高计算效率, δ 和 η 分别取值为 0.5 和 0.1; 基于文献(Lunn et al, 2000)研究结果, 待估参数 α 和 β 的取值范围分别为 $\alpha \in [0.01, 100]$, $\beta \in [0.1, 1]$, 样本通过显著性水平检验, 并使得样本概率函数 $P(I, D)$ 达到最大化, 得到 α 和 β 的最优估计为 $\alpha = 15.16$, $\beta = 0.752$ 。

将计算值代入式(3), 求解古丈县滑坡降水强度持续时间的 I-D 阈值曲线, 如图 13 所示。图 13 中虚线为古丈县持续降水极端值(湖南省质量技术监督局, 2014)对应的平均小时降水强度曲线, 实线为古丈县滑坡阈值曲线。由图 13 可以看出, 古丈县降水诱发滑坡的临界条件均小于相应的降水极值。此外, 受地质环境因子如矿山开发、公路及河网修建等人类活动的影响, 弱降水量诱发滑坡事件频发, 影响到触发阈值的降水强度阈值计算的准确性。

3.2 古丈滑坡有效降水量分析

对观测样本进行质量控制, 剔除非降水型滑坡样本, 并按照滑坡出现时间将滑坡样本与对应的雨量观测数据进行关联, 按照式(1)计算古丈滑坡样例前期有效雨量, 根据(张国平, 2014)的研究成果, 选 $K = 0.8$, $n = 15$ 计算不同时间尺度条件下触发古丈县滑坡的有效降水量, 并对计算结果进行曲线拟合(图 14)。

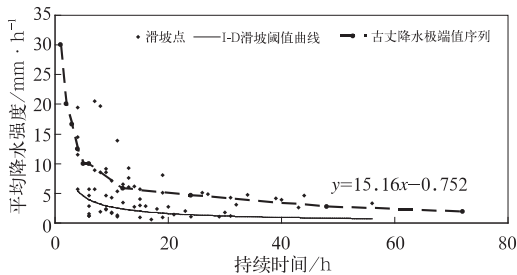


图 13 古丈降水强度持续时间 I-D 曲线图
Fig. 13 The I-D curve of Guzhang area

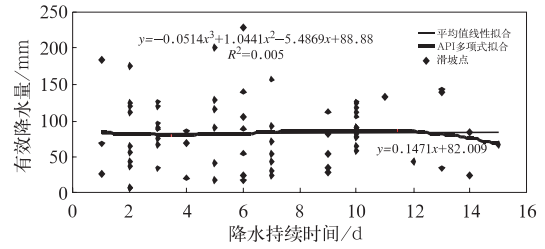


图 14 古丈滑坡持续时间与有效降水量关系图

Fig. 14 The effective rainfall and raining days in Guzhang landslide area

图 14 进一步说明了古丈滑坡平均有效降水量与降水持续天数的相关性不明显, 滑坡出现的有效降水量几乎比较恒定, 如 1 d 滑坡有效降水量为 82.01 mm, 15 d 内出现滑坡时对应的连阴雨天气的有效降水量为 82.4 mm。

4 古丈“7·17”滑坡成因分析

4.1 滑坡降水影响分析

图 15 为古丈默戎镇群体滑坡事件期间(7月 12—17 日)的日降水量(08 时至次日 08 时)序列图。从图中可以看出, 此次暴雨诱发滑坡灾害降水日数只有 4 d 且 7 月 14—16 日累计雨量仅为 3.1 mm, 滑坡前 24 h 累计强降水直接诱发了群体滑坡的发生。因此, 本次群体滑坡主要由短时强降水诱发滑坡地质灾害。

图 16 为 2016 年 7 月 17 日 05—14 时(14 时为滑坡发生时间)逐小时降水序列图, 其中滑坡前 3 h 降水量为 109.3 mm, 最长持续降水时间为 9 h, 最大日降水量为 203.3 mm。利用式(1)计算得到有效降水量为 117.15 mm, 大于古丈县连续 4 d 有效

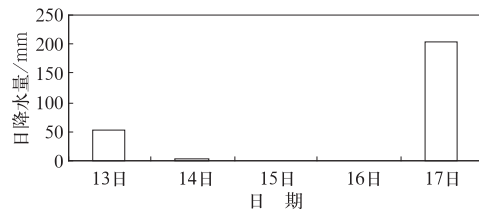


图 15 2016 年 7 月 12—16 日古丈默戎镇滑坡点日连续降水序列图

Fig. 15 The daily precipitation series of Guzhang landslide area during 14—16 July 2016

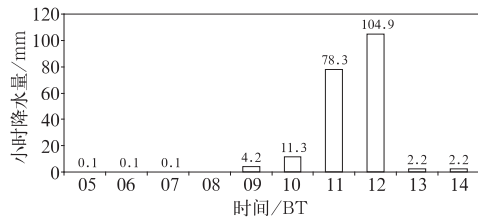


图 16 2016 年 7 月 17 日古丈默戎镇滑坡当日连续降水(小时级)序列图

Fig. 16 The hourly precipitation series of Guzhang landslide area on 17 July 2016

雨量的阈值(82.67 mm)。对应 3.1 和 3.2 节的分析结果,本次滑坡对应的观测 24 h 降水量、日有效降水量和平均降水强度均超过分析的滑坡阈值,其中 9 h 内平均降水强度为 22.58 mm,达到滑坡降水强度阈值(3.1 mm)7.2 倍。

4.2 滑坡综合成因分析

近年来,受地质环境变化和气候变化的影响,古丈县默戎镇为滑坡高发区域,其中 2016 年 7 月 17 日 14 时,受强降雨过程的影响,龙鼻村、盘草村等发生 17 处共计 1.5 万 m³ 的群体性滑坡和泥石流灾害(邹立新和唐星波,2016)。其中最大滑坡点(后演变成坡面泥石流)位置为:28°29′30″N、109°50′31″E。现场勘测上结果为:泥石流宽 40 m,坡体高度约 120 m,坡向 50°,基岩为页岩,岩土产状为 330°,∠10°~15°,

节理较发育,土层厚约 2.0 m*。

基于上述地质环境因子滑坡影响率的研究结果并结合滑坡灾害现场调查资料,对古丈默戎镇群体滑坡进行定量化分析;据勘测结果表明,滑坡导致滑坡点下方焦柳铁路龙鼻 2 号隧道北明洞口被堵,省道 S229 线古丈县至吉首市路段多处出现滑坡和塌方。滑坡点和铁路的距离在 50 m 范围内,相应的滑坡影响因子为 0.214;滑坡点周边附近区域,有一山洪沟河道,该河道里滑坡点最近距离为 70.1 m,对应滑坡-水系样本区间为 50~75 m,对应滑坡影响因子为 0.1069;滑坡实地勘探结果表明,滑坡点对应的岩土类型为沉积碎屑岩建造,对应的滑坡影响因子为 0.431;滑坡处滑坡坡度为 ∠10°~15°,倾向为 330°,对应滑坡影响因子分别为 0.1818 和 0.1606;滑坡产状与滑坡体的关系为“顺向”,对应滑坡影响因子为 0.286;滑坡点对应的地下水类型以孔隙水为主,对应滑坡影响因子为 0.138。

根据 3.1 和 3.2 节的研究成果,对古丈默戎镇达到阈值条件出现的概率进行分析,2010 年以来,古丈县默戎镇共出现滑坡灾害记录 32 条。为研究默戎镇雨量站范围内降水过程达到滑坡阈值出现滑坡的概率,对该记录进行了整理并去掉同一雨量站同一观测时段的不同滑坡点记录(表 2)。

基于历史观测数据库,古丈默戎雨量站 2010—2016 年出现“降水过程内”存在最大整点降水量大

表 2 2010 年至 2016 年 7 月默戎镇及周边地区出现的滑坡及降水雨量情况表

Table 2 Information about the landslide and rainfall of Murong of Guzhang County area between 2010 and July 2017

序号	滑坡出现时间/BT	滑坡位置名称	最大整点雨量/mm	前 3 h 雨量/mm	降水持续时间/h	滑坡前 24 h 雨量/mm
1	2010/6/19 13:00	岩头寨镇老寨村 5 组	31.7	60.3	8	82.4
2	2010/9/30 17:00	断龙山乡猛虎洲村猛虎洲组	4.5	10.3	32	26.2
3	2011/5/10 20:00	高望界乡兴无村 2 区	20.3	20.4	1	20.4
4	2011/6/3 06:00	河蓬乡官坪村官坪组	11.5	13.6	8	17.3
5	2011/6/5 05:00	双溪乡官坝村 3 组	14.4	22.8	6	36.5
6	2011/6/4 07:00	田马寨村 5 组	3.7	7.8	17	19.4
7	2011/6/5 05:00	河蓬乡白羊溪村符家寨组	12.8	26.2	10	60.4
8	2011/6/10 02:00	高望界乡菜坨村 2 区	29.3	59.8	6	60.8
9	2011/6/5 07:20	高望界乡各竹溪工区	8.7	19.5	13	25.9
10	2015/5/18 07:00	默戎镇桐木村	3.8	7.4	16	16.7
11	2016/7/17 12:07	默戎镇龙鼻村 9 组	104.9	194.5	10	203.3
12	2016/7/17 11:40	默戎镇龙鼻村 8 组	78.3	93.4	10	97.2
13	2016/7/17 13:00	默戎镇盘草村 1、2、3 组	104.9	194.5	10	205.5
14	2016/7/17 15:30	默戎镇龙鼻村粮店北侧	104.9	194.5	11	207.6
15	2016/5/7 16:00	默戎镇翁草村	24.6	41.4	10	82.3

* 古丈县国土局,2016. 古丈县默戎镇地质调查报告.

于 15.2 mm 且满足持续降水达到 9 h 以上的降水过程共 17 次,过程有效降水量大于 82.01 mm 共 4 条。表 2 显示默戎镇到达临界条件出现滑坡的次数分别为 8 和 3 次(日降水观测统计中,不同滑坡点同一雨量观测站同日观测记 1 次),对应的概率分别为 47.05% 和 75%。

用向量 \mathbf{A} 表示以上分析的滑坡影响因素,可以得到:

$$\text{得到: } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 2.0019 & 0.4965 & 1.1771 & 1.3325 & 0.7483 & 1.5507 & 0.4553 & 0.2853 \\ 0.4995 & 1.0000 & 0.2480 & 0.5880 & 0.6656 & 0.3738 & 0.7746 & 0.2274 & 0.1425 \\ 2.0140 & 4.0318 & 1.0000 & 2.3707 & 2.6837 & 1.5070 & 3.1232 & 0.9170 & 0.5747 \\ 0.8495 & 1.7007 & 0.4218 & 1.0000 & 1.1320 & 0.6357 & 1.3174 & 0.3868 & 0.2424 \\ 0.7505 & 1.5023 & 0.3726 & 0.8834 & 1.0000 & 0.5615 & 1.1638 & 0.3417 & 0.2141 \\ 1.3364 & 2.6754 & 0.6636 & 1.5732 & 1.7808 & 1.0000 & 2.0725 & 0.6085 & 0.3813 \\ 0.6449 & 1.2909 & 0.3202 & 0.7591 & 0.8593 & 0.4825 & 1.0000 & 0.2936 & 0.1840 \\ 2.1963 & 4.3966 & 1.0905 & 2.5853 & 2.9265 & 1.6434 & 3.4058 & 1.0000 & 0.6267 \\ 3.5047 & 7.0159 & 1.7401 & 4.1254 & 4.6700 & 2.6224 & 5.4348 & 1.5957 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

该矩阵可以计算综合滑坡因子的相对影响率,以便更加清晰描述产生滑坡的主要地质环境因子。对 \mathbf{P} 矩阵求最大特征值对应的特征向量,并归一化得到归一化的特征向量 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = [0.0782, 0.0390, 0.1574, 0.0664, 0.0586, 0.1044, 0.0504, 0.1716, 0.2739]$$

基于归一化的特征向量,可以得出,古丈县默戎镇滑坡的综合滑坡因子为:超过触发滑坡降水临界值的实况有效过程雨量(0.2739)、达到或超过诱发滑坡的降水强度临界阈值(0.1716)、滑坡岩土类型(0.1574)、滑坡体和基岩产状的一致性关系(0.1044),以及公路(铁路)工程切坡的影响(0.0782)。此外,在默戎镇群体滑坡事件中,除地下水类型要素外,其他因子均表现出相同的特征,即滑坡点所在的地质环境因子对应于滑坡风险最大值区间或次大区间。

5 结论和讨论

基于 GIS 空间分析平台,研究古丈县公路(铁路)、水系、坡度、坡向、地下水、岩土类型和坡面与基岩产状关系等地质条件对滑坡的影响率,系统分析了古丈县滑坡地质灾害的多种地质环境特性;基于贝叶斯后验概率分析法研究了古丈暴雨诱发滑坡的降水临界条件和触发滑坡的有效降水量。基于滑坡

$$\mathbf{A} = [0.214, 0.1069, 0.431, 0.1818, 0.1606, 0.286, 0.138, 0.4705, 0.75]$$

为进一步研究古丈默戎镇地质环境的综合因子影响,基于向量 \mathbf{A} ,构造一个矩阵:

$$\mathbf{P} = [a_{ij}], \quad i, j = 0, \dots, 8$$

式中:

$$a_{ij} = \frac{a_i}{a_j}, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, 8$$

地质环境特性和降水诱发滑坡的临界条件以及灾害调查结果,对古丈县默戎镇“7·17”滑坡成因进行对比分析,分析结果显示,“7·17”古丈默戎镇群体滑坡的主要滑坡点位于山区公路、水系的修建切坡近距离处,也位于山区坡度、坡向等的滑坡高风险敏感区域和滑坡频率高值区域,所在位置也处于脆弱的岩土类型和顺向滑坡区域。此外,破历史极值的强降水过程和远大于该地区滑坡阈值的降水强度直接诱发了群体滑坡事件的出现。然而,受降雨型滑坡样本少、气象观测站网空间密度分布不均以及降雨型滑坡模型本地化研究时间短等局限性的影响,本文在样本验证、模型评估方面也存在一定的不足,随着地质风险普查工作持续深入和样本数据的不断丰富,未来对模型的验证和滑坡风险评估以及地质环境影响因素综合评估的工作需继续加强研究。

参考文献

柴波,殷坤龙,2009.顺向岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,28(3):628-634.
 樊晓一,乔建平,2004.滑坡危险度评价的地形判别法[J].山地学报,22(6):730-743.
 郭芳芳,扬农,张岳强,等,2008.基于 GIS 的滑坡地质灾害地貌因素分析[J].地质力学学报,14(1):87-96.
 湖南省质量技术监督局,2014.湖南省地方标准_DB43[S]//湖南极
 端降水事件监测方法与判别指标:DB43/T 835-2013.
 黄达,裴向军,张志刚,等,2008.某公路滑坡成因机制及稳定性[J].
 山地学报,26(6):721-726.

- 马力,游扬声,缪启龙,2008. 强降雨诱发山体滑坡预报[J]. 山地学报,26(5):583-589.
- 乔建平,吴彩燕,田宏岭,2007. 长江三峡库区云阳-巫山段斜坡坡度对滑坡的贡献率[J]. 山地学报,25(2):207-211.
- 乔建平,赵宇,2001. 滑坡危险度区划研究述评[J]. 山地学报,19(2):157-160.
- 谭超,2009. 地下水对滑坡的力学作用研究[D]. 成都:成都理工大学:21-27.
- 田述军,孔纪名,2013. 基于斜坡单元和公路功能的滑坡风险评价[J]. 山地学报,31(5):580-587.
- 王钧,欧国强,杨顺,等,2013. 地貌信息熵在地震后泥石流危险性评价中的应用[J]. 山地学报,31(1):83-91.
- 魏丽,郑有飞,单九生,2005. 暴雨型滑坡灾害预报预警方法研究评述[J]. 气象,31(10):3-6.
- 张国平,2014. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象,40(7):866-890.
- 赵建华,陈汉林,杨树锋,2006. 滑坡灾害危险性评价模型比较[J]. 自然灾害学报,15(1):128-134.
- 邹立新,唐星波,2016. 湘西古丈县山体滑坡公路局四小时抢通水毁路[EB/OL]. (2016-07-18). http://www.zgjtb.com/2016-07/18/content_89877.htm.
- Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, et al, 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. Nat Hazards Earth Sys Sci, 10(1):447-458.
- Caine N, 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geogr Ann, 62(1/2):23-27.
- Chen C Y, Chen T C, Yu F C, et al, 2005. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring[J]. Environ Geol, 47(5):715-724.
- Jaafari A, Najafi A, Rezaeian J, et al, 2015. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran[J]. Land Use Policy, 47(1):198-208.
- Kohler M A, Linsley R K, 1951. Predicting the runoff from storm rainfall[J]. Wea Bur US Res, (34):10.
- Lunn D J, Thomas A, Best N, et al, 2000. WinBUGS—a Bayesian modelling framework: Concepts, structure, and extensibility [J]. Stat Comput, 10(1):325-337.