

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.004

三峡库区降雨型滑坡预警雨量阈值研究

杨诗诗^{1,2}, 叶润青^{1,2*}, 付小林¹, 吴润泽¹, 熊 能^{1,2}, 文天龙^{1,2}

YANG Shi-Shi^{1,2}, YE Run-Qing^{1,2*}, FU Xiao-Lin¹, WU Run-Ze¹, XIONG Neng^{1,2}, WEN Tian-Long^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 三峡库区是滑坡灾害高发地区, 降雨是诱发滑坡的主要因素之一。本文以三峡库区 101 例降雨型滑坡为研究对象, 结合 1980—2019 年降雨监测数据, 采用滑坡发生前 10 d 的日降雨量数据, 拟合出三峡库区降雨强度-降雨历时(I-D)关系阈值曲线表达式, 进一步拟合出不同规模、地层岩性、坡度、坡向、高程等因素下, 不同发生概率的降雨型滑坡 I-D 阈值曲线表达式, 并计算滑坡不同发生概率的临界降雨阈值。研究表明: 滑坡易发地层区的降雨阈值相对小。三叠纪巴东组岩层发生滑坡的降雨阈值最小, 其次为侏罗系; 阳坡为滑坡的易发坡向, 且阳坡滑坡的降雨阈值小于阴坡; 滑坡规模和高程与降雨阈值呈正相关性; 坡度小于 25° 时滑坡发生的概率最大, 对应的降雨阈值最小。本文研究成果可为三峡库区降雨型滑坡预警预报提供支持。

关键词: 降雨型滑坡; 降雨 I-D 阈值曲线; 临界降雨量; 预警预报; 三峡库区

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)03-0445-10

Yang S S, Ye R Q, Fu X L, Wu R Z, Xiong N and Wen T L. 2023. Study on Early Warning Rainfall Threshold of Rainfall Induced Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *South China Geology*, 39(3):445–454.

Abstract: The Three Gorges Reservoir area is rich in high incidence of landslide disasters, and rainfall is one of the main factors inducing landslides. Taking 101 rainfall-type landslides in the Three Gorges Reservoir area as the research object, with reference of the rainfall monitoring data from 1980 to 2019 and the daily rainfall data 10 days before the development of the landslide, this paper fits the threshold of the rainfall intensity-rainfall duration (I-D) relationship in the Three Gorges Reservoir area, then further fits the I-D threshold curve expressions of rainfall-type landslides with different occurrence probabilities under different scales, stratum lithology, slope, slope aspect, elevation and other factors, and finally calculates the critical rainfall thresholds for different occurrence probability of landslides. The study shows that the rainfall threshold in landslide-prone stratum is relatively small. The rainfall threshold of landslide in Badong Group in Triassic is the lowest, followed by Jurassic; The sunny slope is prone to induce landslide, and the rainfall threshold of sunny slope landslide is less than that of shady slope; The scale and elevation of landslide are positively corre-

收稿日期: 2023-4-30; 修回日期: 2023-7-11

基金项目: 国家自然科学基金(41701563)、三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212020CC60002、0001212018CC600010、0001212012AC50021)

第一作者: 杨诗诗(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方向研究, E-mail: sywwcug@163.com

通讯作者: 叶润青(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事三峡库区地质灾害监测预警相关研究, E-mail: jcyerunqing@mail.cgs.gov.cn

lated with rainfall threshold; When the slope is less than 25° , the frequency of landslide is the largest and the corresponding rainfall threshold is the smallest. The research results of this paper can provide reference for the early warning and prediction of rainfall induced landslide in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: Three Gorges Reservoir area; rainfall-induced landslide; rainfall threshold curve; critical rainfall; early warning forecast

三峡库区从古自今一直是我国地质灾害高易发区及滑坡重点防治区。根据 2009 年 7 月湖北省、重庆市库区 26 个区县上报统计资料及国土资源部门调查,三峡库区共发现滑坡、崩塌 5386 处,总体积约 $83 \times 10^8 \text{ m}^3$,地质灾害风险大(侯俊东等, 2012; 董好刚等, 2018)。滑坡是三峡库区内最为严重的地质灾害之一,在时间和空间分布上具有重复性和随机性的双重特点(殷坤龙和朱良峰, 2001)。库区内充沛的降雨、复杂的地形地貌和地质构造为滑坡提供了良好的发育条件。1982 年 7 月,川东地区连降暴雨,造成万县地区各县触发了 8.1 万余起地质灾害(杜榕桓等, 1991)。1993 年万州区仅在 7、8 月份两个月的降雨量就达到了 690 mm,在万县市各县(区)诱发地质灾害 1.1 万余起,直接经济损失达 1.8 亿元人民币(丁继新等, 2004)。滑坡灾害给库区内人民的生命财产安全造成了严重的威胁。

降雨是诱发三峡库区滑坡最主要的外在因素,诱发滑坡的降雨临界值即降雨阈值是降雨型滑坡预警预报的关键。利用统计学方法研究分析区域内的降雨和滑坡数据资料,从而得出经验性降雨阈值是目前常用的研究方法。概括起来,滑坡的经验性降雨阈值模型可分为四类(Guzzetti et al., 2007),分别为降雨强度-降雨历时关系阈值(I-D)、累计降雨量-降雨历时(E-D)关系阈值、累计降雨量-降雨强度(E-I)关系阈值和总降雨量阈值。其中,降雨强度-降雨历时(I-D)关系阈值研究最为广泛,通过建立降雨强度-降雨历时(I-D)阈值的关系曲线,以确定研究区域内的降雨阈值。

国内外众多学者在滑坡降雨阈值的研究方面成果颇丰。刘艳辉和刘丽楠(2016)以花岗岩风化壳地区典型二元结构斜坡为原型,基于饱和-非饱和渗流理论,分析研究降雨入渗过程和斜坡失稳机制,并建立该类斜坡的临界降雨判据(I-D 曲线)。李巍岳等(2017)统计拟合近年来 60 起降雨滑坡事件

的降雨强度与降雨历时的关系,构建了降雨滑坡响应阈值,并通过滑坡实例进行验证。丛佳伟(2020)将天水市 34 个滑坡数据同降雨数据相结合,建立了天水地区降雨型滑坡的降雨强度-降雨历时阈值模型,得到研究区的降雨阈值表达式为 $I = 6.03D^{-0.58}$ 。麻士华等(2011)根据 1990-2003 年雨量监测网记录的小时雨量数据和雨量站附近可确定发生时间的滑坡数据,确定了浙江全省及 6 个易发生滑坡的县级区域滑坡的降雨强度-历时关系阈值。Muaz Abu Mansor Maturidi et al.(2020)以卡梅隆高原滑坡区 12 个滑坡实例为研究对象,分析诱发滑坡的降雨强度-持续时间(I-D),并利用分析得出的最大降雨强度和降雨序列持续时间等重要变量,建立了研究区的经验降雨强度-持续时间(I-D)阈值模型。Fusco et al.(2019)利用现场和实验室数据建立数值模型,以确定该地区在一系列可能的降雨强度和地形坡度范围内诱发滑坡的降雨强度-降雨持续时间(I-D)阈值。

三峡库区滑坡降雨阈值研究近来也取得了较大进展。赵衡和宋二祥(2011)针对国内还没有适用性更广的雨强-持时(I-D)阈值曲线的现状,尝试性地建立了鄂西地区的 I-D 阈值曲线,为 $I = 4.0D^{-0.51}$,并在此过程中提出了确定降雨持时 D 开始时刻的方法。叶殿秀等(2014)分析了滑坡灾害与发生前各个时段降雨的强度、持续时间、总量等之间的关系,初步确定不同保证率下诱发三峡库区滑坡灾害发生的临界降水量值,为开展三峡库区滑坡灾害气象监测预警提供科学依据。陈剑(2005)等通过对库区滑坡-降雨事件进行统计分析,认为最大 24 h 雨强可作为降雨诱发滑坡的有效预报因子,并利用统计方法得出了两个预报区在不同降水条件下滑坡的发生概率。综合以上研究发现,对滑坡发育地质环境条件的差异、滑坡降雨阈值进行精细化分析有待深入研究。因此,有必要考虑滑坡在不同因素影响下的降雨阈

值曲线关系式,得出更为可靠的预警预报结果。

本文在收集三峡库区101例降雨型滑坡实例并分析发育特征基础上,以滑坡发生前10d内的降雨数据,研究三峡库区降雨型滑坡的有效降雨强度-降雨历时关系,进一步拟合不同地质特性的滑坡降雨I-D阈值曲线,并计算出不同发生概率临界雨量阈值。研究结果可为三峡库区降雨型滑坡的预测预报提供支持。

1 研究区概况

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,位于长江上游的宜昌市三斗坪至重庆江津区之间。库区全长超过600 km,横跨鄂西、川东山地,区域内地势西高东低。地形地貌以山地和丘陵为主,一般地面坡度在 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间。区内地层除了缺失志留系上统、泥盆系下统、石炭系上统和第

三系外,其余时代地层均有出露。库区内地层以侏罗系及二叠系为主,岩性为砂岩、粉砂岩、泥灰岩与层厚不等的泥岩、页岩,为软岩和软硬相间岩层,为滑坡灾害发生提供有利地质环境条件。

三峡库区属于亚热带季风气候,气候湿润,降雨充沛。根据库区24个国家气象监测站点1980—2019年降雨监测数据统计,年均降雨量在1100 mm上下波动,最大年均降雨量为1998年的1430.4 mm,最小年均降雨量为2001年的859.9 mm,年际间降雨量差别较大。年均降雨量略显下降趋势,整体线倾向率为 $-15.1\text{ mm}/10\text{a}$ (图1a)。40年来库区年均降雨天数为181.8天,占全年总天数的49.8%,年降雨天数整体呈现减少趋势,线倾向率为 $-16.3\text{ d}/10\text{a}$ (图1b)。且年降雨天数减小的趋势强于年均降雨量下降的趋势,显示了强降雨天气将较以往更为频繁,从另外一个角度说明今后三峡库区降雨型滑坡防灾减灾形势更为严峻。

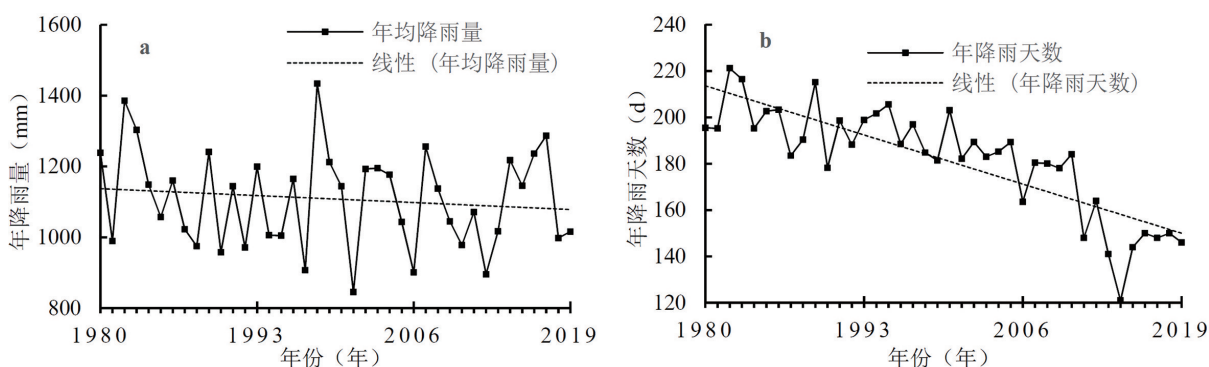


图1 三峡库区1980年—2019年年均降雨量(a)及年降雨天数(b)变化情况

Fig. 1 Changes in annual average rainfall (a) and annual rainfall days (b) in the Three Gorges Reservoir area from 1980 to 2019

2 降雨型滑坡基本特征

通过收集整理已发表的文献、地方官网公告,获取了1980年—2019年40年间三峡库区内由降雨诱发的101例滑坡,即诱发此101例滑坡的主要外在影响因素为降雨,受到库区库水位升降变化及人类工程活动的影响可忽略。滑坡的体积均在 $1\times 10^4\text{ m}^3$ 以上。图2为三峡库区降雨型滑坡的分布及规模。滑坡规模上,小型至特大型均有,主要以中

型和大型为主,小型滑坡及特大型滑坡占比相对较少。滑坡数量占比上,小型、中型、大型、特大型分别占20.8%、33.7%、29.7%和15.8%。空间分布上,滑坡在库区下游段发生较为集中,大型和特大型滑坡主要分布于万州至巴东县,小型滑坡和中型滑坡在库区内分布得相对均匀。

对三峡库区降雨型滑坡发育的地层岩性、高程、坡度和坡向进行了统计(表1),可直观的看出其发育的地质特征,对于了解该类滑坡的发生规律具有较大的意义。

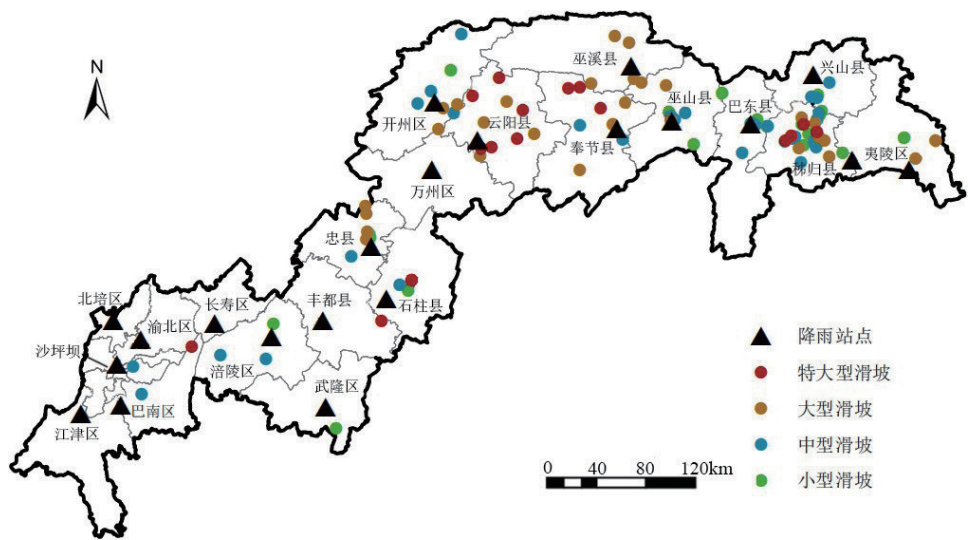


图2 三峡库区降雨型滑坡发育规模及分布情况

Fig. 2 Development scale and distribution of rainfall induced landslides in the Three Gorges Reservoir area

三峡库区分布最广泛的地层为侏罗系和三叠系。据统计,53.5%的降雨型滑坡发生于侏罗系中,33.6%的滑坡发生于三叠系中,其他地层中发生的滑坡数量占滑坡总数量的12.9%。侏罗系和三叠系巴东组是库区易滑地层,这些地层岩石力学强度低,受褶皱和断层的作用易发育节理裂隙,岩石易破碎、风化,且遇水出现软化现象,岩土体强度下降,在降雨的触发作用下易发生变形破坏(杨忠平等,2021)。

表1 三峡库区降雨型滑坡发育的地质特征分析			
Table 1 Analysis of geological characteristics of rainfall induced landslides in the Three Gorges Reservoir area			
分类对象	类别	滑坡数量 (个)	占滑坡总数量的 比例(%)
地层岩性	侏罗系	54	53.5
	三叠系	34	33.6
	其它	13	12.9
高程(m)	<420	52	51.5
	[420,860)	36	35.6
	≥ 860	13	12.9
坡度(°)	<25	49	48.5
	[25,35)	35	34.7
	≥ 35	17	16.8
坡向	阳坡	61	60.4
	阴坡	40	39.6

高程对坡体应力值大小有重要影响,高程越

高,应力值也越大,影响滑坡的势能(罗路广等,2021)。库区降雨型滑坡发生高程范围分布在120.0~1373.5 m之间,420.0 m高程以下滑坡集中发育,共有52处,占滑坡总数量的51.5%。在420.0 m高程以上发生的滑坡数量随高程的增大而减少,这可能是因为高程越高,斜坡岩土体受到的风化程度更深,斜坡已处于稳定状态,受到降雨的影响越低,因此诱发滑坡的可能性越小。

坡度影响着地表水径流和入渗、地下水的补给和排泄、滑坡体内的应力分布、斜坡上松散体的厚度以及是否能提供滑坡发育的有效临空面等方面,是滑坡发育的主要控制因素之一。降雨型滑坡坡度在13°~50°之间,集中发生于25°以下坡度的斜坡上,占到滑坡总数量的48.5%;而在[25°,35°)斜坡及40°以上斜坡上,随着坡度的增大,滑坡发生的几率反而降低。总体上降雨诱发滑坡的坡度相对较大。朝阳或者背阴斜坡上的所受的辐射强度不同,对滑坡的地面蒸发量、岩石风化以及植被覆盖度等产生影响(杨光等,2019),造成岩土体物理力学特征及孔隙水压力分布发生变化(周超等,2020)。按照以南东、南、南西三个方向的斜坡为阳坡(坡向90°~270°)和北东、北、北西方向上的斜坡为阴坡发生的滑坡统计,阳坡的降雨型滑坡共有61例,占滑坡总数量的60.4%。一方面,阳坡的风化作用强于阴坡,且研究区域内岩石强度低,易风化,有利于

滑坡发生;另一方面由于阴坡的植被覆盖面积较阳坡要大,而植物对斜坡岩土体具有降雨截流、抑制地表径流、根系吸水和植物蒸腾等可以降低孔隙水压力的作用(Pollen-Bankhead and Simon, 2010),在一定程度上遏制了滑坡发生的可能性。

3 滑坡与降雨关系分析

根据滑坡发生的具体时间、位置信息,结合滑坡附近的气象站点降雨监测数据,获得了滑坡发生当日及以前一段时期内的日降雨量信息。

3.1 滑坡与月降雨关系分析

根据 1980 年—2019 年降雨数据统计,得出库区月平均降雨量分布图(图 3)。在此基础上,将收集的滑坡发生月份与月降雨量分布情况二者进行对比分析,得出滑坡发生数量与月份降雨量变化情况较为一致。滑坡主要集中发生于 6~9 月,此期间内发生的滑坡数量占 70.3%。在 3 月、11 月和 12 月发生的滑坡比例较小,1 月、2 月则没有滑坡发生。3~7 月份,滑坡数量随月降雨量的增大而增多,在 7 月份达到最大值,占比为 25.7%。7 月之后,滑坡数量整体呈下降趋势(图 3)。

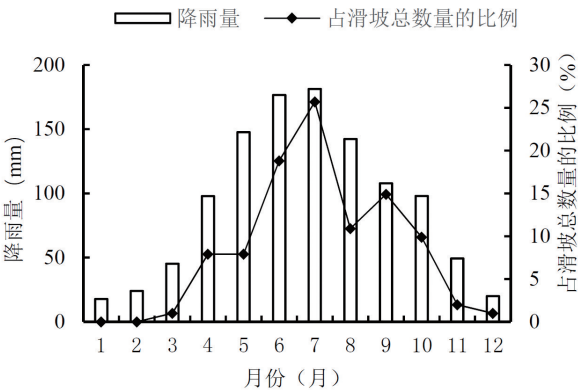


图3 三峡库区 1980 年—2019 年月平均降雨量与发生的滑坡数量的关系

Fig. 3 Relationship between annual average monthly rainfall and the number of landslide in the Three Gorges Reservoir Area from 1980 to 2019

3.2 滑坡的降雨强度-降雨历时关系阈值

据统计,32.4%的滑坡在发生当日出现暴雨事

件,而有 42.6%的滑坡发生当日出现了小雨事件或无降雨。可见滑坡的发生不仅受当日降雨量的影响,同时还受前期降雨量的影响。由于部分滑坡的发生时间不能精确到以小时为单位,本文将利用滑坡发生前 10 d 内的降雨强度-降雨历时(I-D)阈值模型对三峡库区内降雨型滑坡进行预警。

根据 Crozier(1986)提出的有效降雨量公式对前期有效降雨量进行计算,即

$$R_e = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \cdots + \alpha^n R_n$$

其中, R_e 为有效降雨量; R_0 为滑坡发生当日降雨量; n 为滑坡发生前的天数, R_n 为滑坡发生前 n 日的降雨量, α 为有效降雨系数,本文有效降雨系数取经验值 0.84(Bruce and Clark, 1969)。

根据不同滑坡降雨阈值曲线对应的滑坡发生概率,建立三峡库区降雨型滑坡预警预报等级(林巍等,2020)(表 2)。

表 2 滑坡预警预报分级				
Table 2 Classification of landslide early warning and prediction				
滑坡发生概率	<10%	[10% , 50%)	[50%, 90%)	≥ 90%
滑坡危险性等级	低	中	高	极高
预警预报等级	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警

3.2.1 三峡库区降雨型滑坡的 I-D 阈值

将 101 例降雨型滑坡的降雨历时和降雨强度绘制在 I-D 双对数坐标系中,按照 10%(x)、50%(y)、90%(z)的滑坡发生概率拟合降雨阈值曲线(图 4)所示,其表达式分别为 $I_{10\%}=10.726D^{-0.594}$ 、 $I_{50\%}=33.014D^{-0.594}$ 、 $I_{90\%}=85.936D^{-0.594}$ 。由表达式可以得出,随着降雨历时增长,诱发滑坡的降雨强度逐渐减小。当滑坡位于 10%降雨阈值曲线上时,滑坡危险性等级为中等级,已达到黄色预警级别。滑坡位于 50%降雨阈值曲线上时,滑坡危险性等级为高等级,已达到橙色预警级别。滑坡位于 90%降雨阈值曲线上时,滑坡危险性等级为极高,已达到红色预警级别。

根据得到的降雨阈值表达式,将不同降雨历时情况下滑坡发生的临界降雨量列于表 3 中。可以看到,降雨历时越长,滑坡发生的临界降雨量越大。当

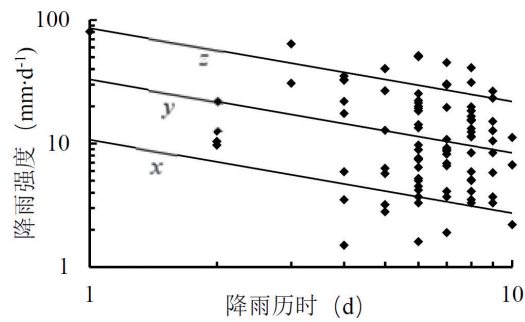


图4 三峡库区滑坡降雨阈值曲线

Fig. 4 Rainfall threshold curve of landslide in the Three Gorges Reservoir area

降雨历时分别为1 d、5 d、9 d,降雨量为10.7 mm、20.6 mm、26.2 mm时,达到了滑坡发生10%概率曲线,换言之,此时库区内有10%的滑坡产生;降雨量达到33.0 mm、63.5 mm、80.6 mm时,达到滑坡发生50%概率曲线,即滑坡发生的平均降雨量,库区内50%的滑坡已经发生;而当降雨量达到85.9 mm、165.2 mm、209.7 mm时,达到滑坡发生90%概率曲线,此时库区内的90%的滑坡已经产生。

3.2.2 不同地质特性的滑坡I-D 阈值

分别将不同规模、地层岩性、高程、坡度、坡向的滑坡降雨强度与降雨历时绘制于双对数 I-D 坐标系中,得出三峡库区滑坡 I-D 阈值曲线(图5、图6、图7、图8、图9)及其表达式(表4)。

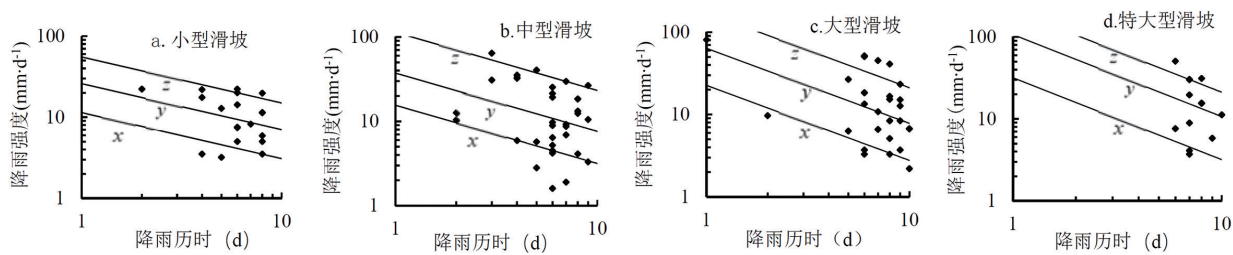


图5 三峡库区不同规模滑坡的阈值曲线

Fig. 5 Threshold curve of landslides of different scales in the Three Gorges Reservoir area

(2)侏罗系中滑坡发生前的降雨历时为2~10 d,集中分布于6~10 d,降雨强度集中为4.0~31.2 mm·d⁻¹之间,平均降雨强度为14.3 mm·d⁻¹,降雨强度超过14.3 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为6~9 d(图6a);三叠系中滑坡发生前的降雨历时分布在2~10 d内,降雨强度集中于1.9~21.9 mm·d⁻¹,平

表3 三峡库区降雨型滑坡发生的临界降雨量

Table 3 Critical rainfall for rainfall induced landslide development in the Three Gorges Reservoir area

降雨阈值曲线	不同降雨历时的临界降雨量(mm)		
	1d	5d	9d
10%发生概率	10.7	20.6	26.2
50%发生概率	33.0	63.5	80.6
90%发生概率	85.9	165.2	209.7

(1)小型滑坡发生前的降雨历时为3~9 d,降雨强度集中在5.0~22.2 mm·d⁻¹之间,平均降雨强度为11.7 mm·d⁻¹,其中降雨强度在11.7 mm·d⁻¹以上的滑坡降雨历时主要为5d、6d和8d(图5a);中型滑坡发生前的降雨历时为2~9 d,降雨强度集中在4.5~32.4 mm·d⁻¹之间,平均降雨强度为16.0 mm·d⁻¹,其中降雨强度大于16.0 mm·d⁻¹的滑坡在降雨历时为3~9d均有出现(图5b);大型滑坡发生前降雨历时在1~10 d内均有分布,在6~9 d集中分布,降雨强度集中在3.4~23.3 mm·d⁻¹之间,平均降雨强度为18.8 mm·d⁻¹,其中降雨强度大于18.8 mm·d⁻¹的滑坡的降雨历时出现在1d和5~9 d(图5c);特大型滑坡发生前降雨历时集中分布于6~10 d,降雨强度集中在5.8~31.2 mm·d⁻¹之间,平均降雨强度为18.5 mm·d⁻¹(图5d)。

均降雨强度为13.3 mm·d⁻¹(图6b);其它地层中滑坡发生前的降雨历时为1~10 d,降雨强度在1.5~80.5 mm·d⁻¹之间,分布较为分散,平均降雨强度为18.0 mm·d⁻¹,降雨强度超过18.0 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时为1 d、3 d、4 d及6 d(图6c)。

(3)420 m 高程以下滑坡发生前的降雨历时为

2~10 d,集中分布于4~10 d,降雨强度集中为4.2~35.2 mm·d⁻¹,平均降雨强度为15.1 mm·d⁻¹,降雨强度大于15.1 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为4~9 d(图7a);[420 m,860 m)高程内滑坡发生前的降雨历时为1~10 d,集中分布于4~10d,降雨强度集中为3.3~40.2 mm·d⁻¹,平均降雨强度为17.7 mm·d⁻¹,

降雨强度大于17.7 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为3~7d(图7b);860 m高程以上滑坡发生前的降雨历时为3~10 d,降雨强度集中为6.6~31.2 mm·d⁻¹,平均降雨强度为17.3 mm·d⁻¹,降雨强度大于17.3 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为3 d、4d和8d(图7c)。

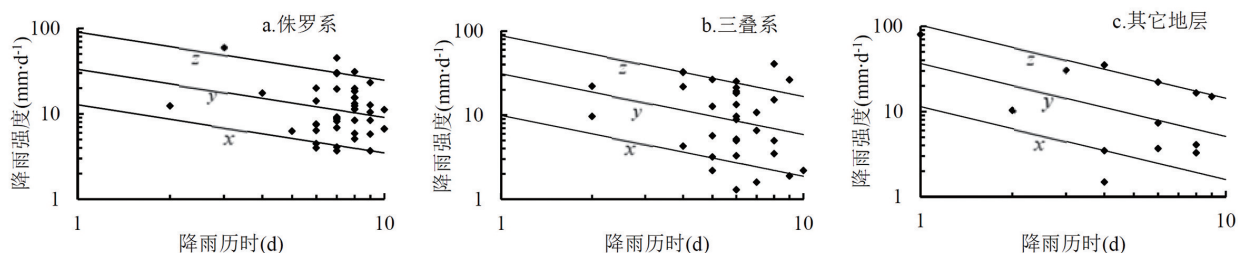


图6 三峡库区不同地层岩性的滑坡阈值曲线

Fig. 6 Landslide threshold curve of different strata lithology in the Three Gorges Reservoir area

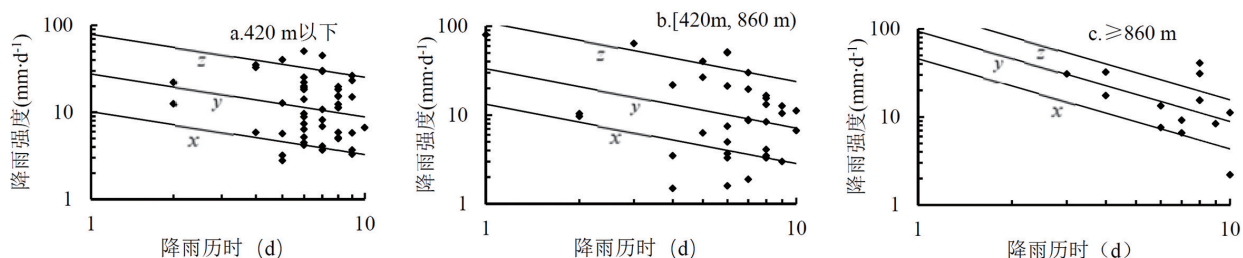


图7 三峡库区不同高程的滑坡阈值曲线

Fig. 7 Threshold curves of landslides at different elevations in the Three Gorges Reservoir area

(4)25°坡度以下滑坡发生前的降雨历时为2~10 d,集中分布于4~10 d,降雨强度集中为5.1~26.7 mm·d⁻¹,平均降雨强度为13.5 mm·d⁻¹,降雨强度大于13.5mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为4~8 d(图8a);25°~35°坡度内滑坡发生前的降雨历时为2~10 d,降雨强度集中为4.2~32.4 mm·d⁻¹,

平均降雨强度为19.0 mm·d⁻¹,降雨强度大于19.0 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为6~9d(图8b);35°坡度以上滑坡发生前的降雨历时为1~10 d,降雨强度集中为5.2~45.2 mm·d⁻¹,平均降雨强度为38.6 mm·d⁻¹,降雨强度大于38.6 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时为1 d和3d(图8c)。

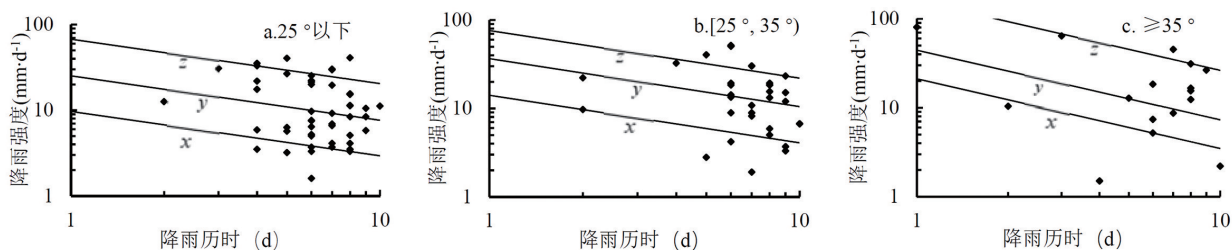


图8 三峡库区不同坡度的滑坡阈值曲线

Fig. 8 Threshold curves of landslides with different slopes in the Three Gorges Reservoir area

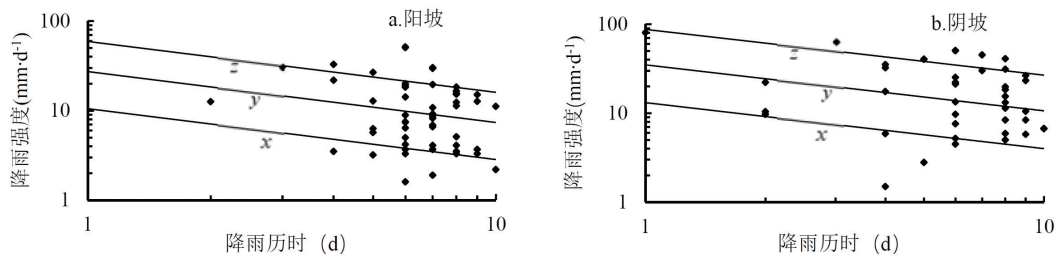


图9 三峡库区不同坡向的滑坡阈值曲线

Fig. 9 Threshold curves of landslides with different slope orientations in the Three Gorges Reservoir area

(5)阳坡坡向上滑坡发生前的降雨历时为2~10 d,集中分布于5~9 d,降雨强度集中为3.8~21.9 mm·d⁻¹,平均降雨强度为12.8 mm·d⁻¹,降雨强度大于12.5 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时为3~9 d(图9a);阴坡坡向上滑坡发生前的降雨历时为1~10 d,集中分布于6~9d,降雨强度集中为5.9~50.6 mm·d⁻¹,平均降雨强度为21.1 mm·d⁻¹,降雨强度大于21.1 mm·d⁻¹的滑坡降雨历时主要为4~9d(图9b)。

由结果可以看出,滑坡规模、坡度和高程与诱发滑坡发生的降雨阈值为正相关关系。滑坡的规模和高程越大,则其降雨阈值也越大,并且增大的幅度呈递增变化(表4)。当坡度小于25°时滑坡发生的降雨阈值最小,这与库区内滑坡灾害集中发生

于25°坡度以下斜坡的统计结果相符合。三叠系中发生的滑坡降雨阈值较小,其次为侏罗纪地层,这可能与库区内各地层出露的面积不同有关。此外,阳坡方向的滑坡降雨阈值小于阴坡,阳坡是滑坡的易发坡向。

3.3 降雨型滑坡临界降雨量

按照滑坡降雨阈值曲线表达式,可以计算出滑坡在不同的规模、地层岩性、高程、坡度、坡向的影响下,当发生概率为10%、50%和90%时,其对应的1d、5d和9d的临界降雨量(表5)。

在滑坡集中发生的特征范围内,临界降雨量相对较小。将滑坡不同发生概率的临界降雨量列于表5,可将其作为库区降雨型滑坡的预警预报依据。

表4 三峡库区滑坡降雨阈值曲线表达式

Table 4 Expression of rainfall threshold curve for landslides in the Three Gorges Reservoir area

分类对象	类别	阈值曲线表达式		
		10%发生概率	50%发生概率	90%发生概率
滑坡规模	小型	$I=11.403D^{-0.568}$	$I=25.929D^{-0.568}$	$I=55.338D^{-0.568}$
	中型	$I=15.465D^{-0.689}$	$I=37.166D^{-0.689}$	$I=113.51D^{-0.689}$
	大型	$I=22.604D^{-0.911}$	$I=63.631D^{-0.911}$	$I=172.45D^{-0.911}$
	特大型	$I=31.743D^{-0.999}$	$I=106.6D^{-0.999}$	$I=210.99D^{-0.999}$
地层岩性	侏罗系	$I=12.776D^{-0.564}$	$I=33.192D^{-0.564}$	$I=90.499D^{-0.564}$
	三叠系	$I=9.941D^{-0.717}$	$I=31.31D^{-0.717}$	$I=88.397D^{-0.717}$
	其它地层	$I=11.451D^{-0.855}$	$I=36.639D^{-0.855}$	$I=102.72D^{-0.855}$
高程(m)	< 420	$I=10.16D^{-0.493}$	$I=25.544D^{-0.493}$	$I=78.821D^{-0.493}$
	[420, 860)	$I=13.239D^{-0.668}$	$I=33.209D^{-0.668}$	$I=110.8D^{-0.668}$
	≥ 860	$I=45.725D^{-1.024}$	$I=93.663D^{-1.024}$	$I=165.413D^{-1.024}$
坡度(°)	< 25	$I=9.69D^{-0.518}$	$I=25.177D^{-0.518}$	$I=67.463D^{-0.518}$
	[25, 35)	$I=14.084D^{-0.538}$	$I=36.309D^{-0.538}$	$I=75.987D^{-0.538}$
	≥ 35	$I=21.187D^{-0.784}$	$I=44.466D^{-0.784}$	$I=160.307D^{-0.784}$
坡向	阳坡	$I=10.514D^{-0.568}$	$I=27.272D^{-0.568}$	$I=59.193D^{-0.568}$
	阴坡	$I=13.108D^{-0.516}$	$I=34.863D^{-0.516}$	$I=87.486D^{-0.516}$

表 5 三峡库区滑坡发生的临界降雨量

Table 5 Critical rainfall for landslides in the Three Gorges Reservoir area

类别	分类	不同降雨历时的临界降雨量(mm)								
		10%发生概率			50%发生概率			90%发生概率		
		1 d	5 d	9 d	1 d	5 d	9 d	1 d	5 d	9 d
滑坡规模	小型	11.4	22.9	29.5	25.9	52.0	67.0	55.3	110.9	143.0
	中型	15.5	25.5	30.6	37.2	61.3	73.6	113.5	187.2	224.8
	大型	22.6	26.1	27.5	63.6	73.4	77.4	172.5	199.0	209.7
	特大型	31.7	31.8	31.8	106.6	106.8	106.8	211.0	211.3	211.5
地层岩性	侏罗系	12.8	25.8	33.3	33.2	67.0	86.5	90.5	182.6	235.9
	三叠系	9.9	15.7	18.5	31.3	49.4	58.3	88.4	139.4	164.6
	其它地层	11.5	14.5	15.7	36.6	46.3	50.4	102.7	129.7	141.3
高程(m)	<420	10.2	23.0	31.0	25.5	57.8	77.8	78.8	178.2	240.1
	[420,860)	13.2	22.6	27.5	33.2	56.7	68.9	110.8	189.1	229.8
	≥ 860	45.7	44.0	43.4	93.7	90.1	88.9	165.4	159.1	156.9
坡度(°)	<25	9.7	21.0	27.9	25.2	54.7	72.6	67.5	146.5	194.5
	[25,35)	14.1	29.6	38.9	36.3	76.4	100.2	76.0	159.8	209.7
	≥ 35	21.2	30.0	34.1	44.5	63.0	71.5	160.3	226.9	257.7
坡向	阳坡	10.5	21.1	27.2	27.3	54.7	70.5	59.2	118.6	152.9
	阴坡	13.1	28.6	38.0	34.9	76.0	101.0	87.5	190.7	253.4

总体而言,对同一类型的滑坡,在相同发生概率下,降雨历时与诱发滑坡的临界降雨量呈正相关关系;当降雨历时保持不变,滑坡发生概率越高,对应的临界降雨量也越大。

一般情况下,同一类型的滑坡随降雨历时的增大,诱发滑坡的临界降雨量随之增长。在相同降雨历时下,临界降雨量随滑坡规模的增大而增大。如特大型滑坡,当1d降雨量为31.7 mm、106.6 mm、211.0 mm,滑坡发生概率分别已达到10%、50%、90%。从小型到特大型,相同发生概率下1d、5d和9d的临界降雨量差距逐渐减少。特大型滑坡在同一发生概率条件下的1d、5d和9d的临界降雨量趋于一致,说明降雨达到临界值时,特大型滑坡仅需一天降雨即会发生。

地层岩性方面,三叠系中的滑坡临界降雨量最小,其次为侏罗系。在不同发生概率下,侏罗系和三叠系中诱发滑坡的临界降雨量在降雨历时较短时明显小于其它地层,随着降雨历时的增长,侏罗系和三叠系中诱发滑坡的临界降雨量大于其它地层。

高程方面,860 m 高程以下的滑坡,临界降雨量随降雨历时的增长而增大。860 m 高程以上的滑坡仅需降雨 1d,当降雨量分别为 45.7 mm、

93.7 mm、165.4 mm 时,滑坡发生概率分别达到10%、50%、90%,不再随降雨历时的增大而变化。

坡度方面,在同一坡度条件下,随着滑坡发生概率的增大,临界降雨量在增大。坡度为25°以下时,诱发滑坡的临界降雨量最小。在10%和50%发生概率下,[25°,35°)坡度的临界降雨量相对较大。而在90%的发生概率的条件下,坡度≥35°发生滑坡的临界降雨量明显大于35°以下坡度。

坡向方面,不同概率下发生于阳坡方向的滑坡的临界降雨量均小于阴坡。阳坡与阴坡间的临界降雨量差值不同,当降雨历时为5d,在10%、50%、90%发生概率下,阴坡与阳坡发生的滑坡临界降雨量差值分别为7.6 mm、21.3 mm、30.5 mm。

4 结论

(1)本文收集了三峡库区1980年-2019年40年间降雨诱发的101处滑坡的资料,这些滑坡主要发生在侏罗系中,占滑坡总数量的53.5%;滑坡多发生于坡度25°以下、高程420 m以下的斜坡上,且以阳坡居多;25°以上坡度的滑坡发生频率随坡度的增大而减小;滑坡主要发生在每年的6~9月,此期

间内发生的滑坡数量占 70.3%,且滑坡发生数量与月降雨量变化趋势较为一致。

(2)采用滑坡发生概率划分了三峡库区降雨型滑坡预警等级,通过滑坡发生前 10d 的日降雨量数据,拟合出不同发生概率下库区降雨型滑坡的降雨强度-降雨历时(I-D)关系阈值曲线,分别为 $I_{10\%}=10.726D^{-0.594}$ 、 $I_{50\%}=33.014D^{-0.594}$ 、 $I_{90\%}=85.936D^{-0.594}$ 。

(3)对滑坡的规模、地层岩性、高程、坡度和坡向进行分类,结合降雨数据得出滑坡的 I-D 阈值曲线,在滑坡集中发生的特征范围内,降雨阈值相对较小。滑坡的规模和高度越大,则其降雨阈值也越大,并且增大的幅度呈递增变化;坡度小于 25°时滑坡发生的概率最大,对应的降雨阈值最小。三叠系中发生的滑坡降雨阈值较小,其次为侏罗系;诱发阳坡方向滑坡的降雨阈值较阴坡要小,阳坡是滑坡的易发坡向。此外,由不同概率阈值曲线计算得到的临界降雨量,可作为库区降雨型滑坡的预警预报依据。

参考文献:

- 陈剑,杨志法,李 晓.2005.三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J].岩石力学与工程学报,24(17):3052-3056.
- 丛佳伟.2020.天水地区降雨型滑坡的降雨阈值研究[D].兰州大学硕士学位论文,1-57.
- 丁继新,尚彦军,杨志法,张路青.2004.降雨型滑坡预报新方法[J].岩石力学与工程学报,23(21):3738-3743.
- 董好刚,霍志涛,田 盼.2018.崩塌、滑坡与涌浪——认识三峡库区地质灾害[J].华南地质与矿产,34(4):360-365.
- 杜榕恒,刘新民,袁建模,李天池.1991.长江三峡工程库区滑坡与泥石流研究[M].成都:四川科学技术出版社,1-203.
- 侯俊东,侯甦予,吕 军,朱冬元.2012.三峡库区地质灾害监测预警工程经济效益评估分析[J].中国地质灾害与防治学报,23(2):64-69.
- 刘艳辉,刘丽楠.2016.基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J].工程地质学报,24(4):542-549.
- 林 巍,李远耀,徐 勇,连志鹏,曹 颖,盛逸凡.2020.湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J].长江科学院院报,37(2):48-54.
- 李巍岳,刘 春,Marco Scaioni,孙伟伟,陈 钰,姚东京,陈 生,洪阳,张凯航,程国栋.2017.基于滑坡敏感性与降雨强度-历时的中国浅层降雨滑坡时空分析与模拟[J].中国科学:地球科学,47(4):473-484.
- 罗路广,裴向军,黄润秋,裴 钻,朱 凌.2021. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J].工程地质学报,29(2):526-535.
- 麻士华,李长江,孙乐玲,李 炜,何彩芬.2011.浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J].中国地质灾害与防治学报,22(2):20-25.
- 杨 光,徐佩华,曹 琛,张 文,兰志广,陈俊淇,董秀军.2019.基于确定性系数组合模型的区域滑坡敏感性评价[J].工程地质学报,27(5):1153-1163.
- 杨忠平,李绪勇,赵 茜,张益铭,刘新荣.2021.关键影响因子作用下三峡库区堆积层滑坡分布规律及变形破坏响应特征[J].工程地质学报,29(3):617-627.
- 叶殿秀,陈鲜艳,张 强,马占山.2014. 1971 ~ 2003 年三峡库区诱发滑坡的临界降水阈值初探[J].长江流域资源与环境,23(9):1289-1294.
- 殷坤龙,朱良峰.2001.滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J].地质前缘,8(2):279-284.
- 赵 衡,宋二祥.2011.诱发区域性滑坡的降雨阈值[J].吉林大学学报(地球科学版),41(5):1481-1487.
- 周 超,殷坤龙,曹 颖,李远耀.2020.基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J].地球科学,45(6):1865-1876.
- Bruce J P, Clark R H. 1969. Introduction to Hydrometeorology [M]. London: Pergamon Press.
- Crozier M J. 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment[M]. London: Routledge Kegan & Paul.
- Fusco F, De Vita P, Mirus B B, Baum R L, Allocca V, Tufano R, Di Clemente E, Calcaterra D. 2019. Physically Based Estimation of Rainfall Thresholds Triggering Shallow Landslides in Volcanic Slopes of Southern Italy[J]. Water, 11(9): 1915.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark C P. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 98(3-4):239-267.
- Muaz Abu Mansor Maturidi A, Kasim N, Abu Taib K, Nur Aifa Binti Wan Azahar W, Husain Husian N M. 2020. Rainfall-induced landslides in Cameron Highland Area, Malaysia[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 917, 012019.
- Pollen-Bankhead N, Simon A. 2010. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story?[J]. Geomorphology, 116(3):353-362.