

引用格式:张添锋,郭朝旭. 福建山区泥石流临界降雨阈值[J]. 山地学报,2021,39(5):701-709.

ZHANG Tianfeng, GUO Chaoxu. Rainfall threshold of debris flow in Fujian mountainous area, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5):701-709.

福建山区泥石流临界降雨阈值

张添锋^{1,2}, 郭朝旭^{1,2,3}

(1. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室,福州 350002; 2. 福建省地质工程勘察院 福建省地质工程重点实验室,福州 350002; 3. 福建省建筑科学研究院有限责任公司 福建省绿色建筑重点实验室,福州 350002)

摘要:泥石流的降雨预警指标常常选用前期有效降雨量和激发雨强进行评价,而前期有效降雨的关键在于确定前期降雨影响天数和日降雨衰减系数。福建山区每年发生的泥石流众多且危害大。本文结合福建山区降雨特点,总结了前期有效降雨量确定方法以及福建区域的泥石流概况,通过对比历史数据 8 d 及 14 d 前期降雨量,确定了 8 d 作为前期有效降雨量影响时间;通过引入格拉布斯准则剔除异常数据和利用凸包算法寻找散点数据的外边界,建立了前期有效降雨量与 1 h 激发雨量的幂指数关系;最后根据福建地区的泥石流发育特征,分析了泥石流降雨阈值预测模型的影响因素及未来改进方向。结果表明福建省泥石流类型主要为坡面型泥石流,且利用前期有效降雨量和短历时强降雨建立的阈值模型 $f(h_{60}, Re) = h_{60} - 38.93Re^{-0.12}$ (h_{60} 为小时降雨量; Re 为前期有效降雨量) 在泥石流启动方面获得较好的预测效果;单沟泥石流的启动除了降雨外还与下垫面的地形和物源量存在一定的联系。本研究可为福建地区多植被覆盖区泥石流的降雨阈值模型提供一种改进方法与思路。

关键词: 福建山区; 临界降雨阈值; 泥石流启动条件; 前期有效降雨量

中图分类号: P694

文献标志码: A

福建省地质灾害主要有滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷等灾种,具有点多、分布广、规模小、危害大和突发性强等特点。福建山区泥石流灾害突发性强,运动距离远,危害较其他灾害更大^[1],绝大多受强降雨诱发(以下称降雨型泥石流)。

泥石流的预测预报主要是通过选取降雨参数来建立预警模型而实现的,因此合理的降雨阈值是确保泥石流警报准确性的关键^[2-3]。对于激发泥石流灾害的临界降雨阈值现有方法众多,主要分为实证法、频率经验法、模型统计法和启动机理法等,其中:(1)实证法原理是通过统计分析实际泥石流案例与降雨资料,建立有效降雨和特征激发雨量(10 min、30 min、1 h 雨量等)的关系^[4-7],该方法在泥石流的

早期研究中得到了重视与应用^[8],例如中科院东川泥石流观测站通过长期监测,建立了著名的东川泥石流降雨型临界启动模型;(2)频率经验法主要应用于降雨资料丰富但灾害资料缺乏的地区,通过计算暴雨发生频率,统计分析强降雨与灾害发生频率的关系,从而建立泥石流降雨阈值^[9-10];(3)模拟试验统计法是通过模型实验及原位实验,重现泥石流动力学过程,统计推测泥石流降雨预警值^[11];(4)启动机理法适用于水力类泥石流,利用水文学方法推求其致灾阈值^[12-13]。

上述实证法、频率经验法和模拟实验统计方法属于统计类方法,这些方法需要收集长期的雨量序列资料和灾害资料,缺乏严格的算法推导及理论基

收稿日期(Received date):2020-07-23 修订日期(Accepted date):2021-10-21

基金项目(Foundation item):福建省生态地质项目(闽地环务[2021]56号)[Fujian Eco-Geological Project (Fujian Bureau of Geology and Mineral Resources Development [2021] No. 56)]

作者简介(Biography):张添锋(1987-),男,福建福州人,硕士,工程师,主要研究方向:地质灾害防治。[ZHANG Tianfeng (1987-), male, born in Fuzhou, Fujian province, M.Sc., research on debris flow initiation and erosion mechanism] E-mail: 773973133@qq.com

础,在缺乏监测资料的偏远山区难度较大,与野外实际条件有一定的差距;同时启动机理法属于理论类分析方法。统计类方法是对泥石流机理认识的初步,对降雨型泥石流的预警有积极作用,然而由于认识初浅,实际误差较大。随着持续的野外观测和丰富的资料积累,对泥石流机制的认识上升到定量的机理分析,这时理论类方法往往可以取得较好的预期。实际上,对于特定区域的泥石流降雨预警方法来说,单一的降雨指标不能代表复杂的现实条件和力学机制,应根据预测要求与精度选择合适的手段^[14]。

降雨是激发福建山区滑坡泥石流的决定因素。已有研究发现,福建地区泥石流灾害占总数 11%,由短期降水诱发,降雨临界值为 3 d 有效降水大于 26.2 mm^[15];福建地区地质灾害主要受前 4 天的强降雨过程诱发^[16]。虽然关于福建地区降雨与灾害关系的相关研究较多,但尚未建立完善和统一的降雨阈值模型。本文根据福建地区地质灾害主要受短期降雨影响的特点,确定前期有效降雨量和 1 h 降雨量作为降雨阈值的分析参数,制定了临界降雨阈值曲线拟合方法,通过分析 15 个泥石流灾害事件,得到福建地区泥石流临界降雨阈值曲线公式;分析了有效降雨影响天数、衰减系数及下垫面对临界降雨阈值曲线的影响,通过与已有文献数据进行对比分析,验证了该公式的适用性和合理性。本研究可为福建泥石流科学预警预报提出科学依据。

1 研究区域

福建地势西北高、东南低,与海岸大体平行的武夷山脉、鹫峰山—戴云山—博平岭两列大山带斜贯全境,构成福建地形的主体框架(图 1)。地貌类型多样,以山地丘陵为主。闽东北、闽中、闽西地区以中山、低山和丘陵为主,分布众多串珠状河谷盆地;东南沿海地区地势低缓,以平原、台地和丘陵为主。

同时福建靠近北回归线,受季风环流和地形的影响,形成暖热湿润的亚热带海洋性季风气候,热量丰富,全省 70% 的区域 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $5000\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 7600\text{ }^{\circ}\text{C}$,雨量充沛,光照充足,年平均气温 $17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均降雨量 $1400 \sim 2000\text{ mm}$,是中国雨量最丰富的省份之一。闽西北武夷山脉和闽东—闽中鹫峰山、戴云山、博平岭山脉成为影响福建沿海山区不

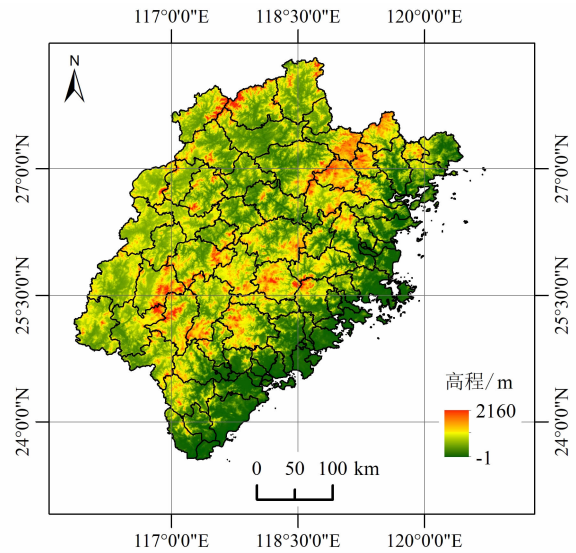


图 1 福建地区高程图

Fig. 1 Elevation map of Fujian, China

同降雨类型的分带界线。武夷山脉与鹫峰山、戴云山之间断陷坳地三明、南平等地则成为福建汛期强降雨中心^[1]。福建地区导致泥石流的主要雨型包含连阴雨、短时强降雨、长时间强降雨,每种类型均会激发泥石流灾害。

福建处于我国经济发达的东部沿海地区,可利用的工业和住宅用地较少,经济和人为活动的影响增加了泥石流灾害的危害性。如图 2 所示,经过统计在现存泥石流灾害中,南平、宁德和福州占据了福建地质灾害的 70%。另外福建山地丘陵占全省陆地面积约 90%,素有“八山一水一分田”之称,但由

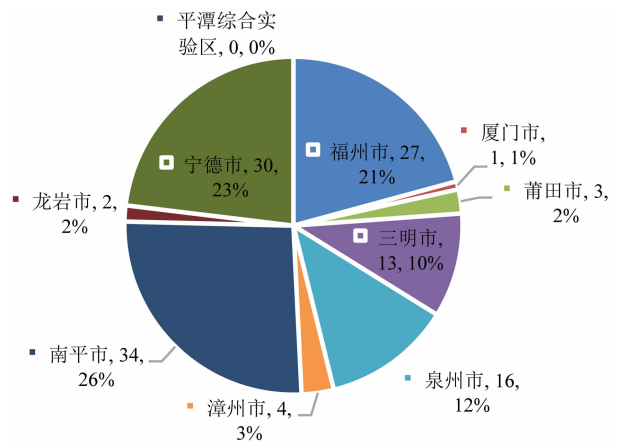


图 2 福建各地区泥石流灾害数量及所占比例(截至 2020 年 12 月)

Fig. 2 Number and proportion of debris flow disasters in cities of Fujian province (by the end of December, 2020)

于山地规模不大,最高点位于南平市武夷山,海拔 2160 m;同时福建省森林覆盖率达 66.8% (截至 2018 年),连续 40 年位列全国第一森林覆盖率全国第一,因此与我国西部山区相比泥石流规模方面相对较小。

根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》T/CAGHP006-2018,泥石流规模可划分为小型、中型、大型和超大型,并将小型、中型列为县级、市级治理的地质灾害隐患点,大型及以上列为省级治理的地质灾害隐患点。经过统计,在 130 个现有泥石流灾害点中,小型为 91 个 (占 70%),中型为 6 个,大型及以上为 33 个。

本文采用的泥石流灾害数据来源于福建省地质灾害防治信息网 (http://112.5.189.8:9300/fjdzzh/Business_MvcDzzh/DisasterSiteHomePage/Index) 以及现场调研。福建地区主要以坡面型泥石流为主,邵武晒口沟泥石流和建阳下垵沟泥石流为该地区两个典型的坡面型泥石流。这两条泥石流沟发生当天雨情及泥石流特征分别见图 3 和表 1,从中可以看

出,下垵沟和晒口沟泥石流均属于极低频次坡面稀性泥石流,是福建省典型的坡面崩滑引发的泥石流。

2 前期有效降雨量确定

现有学者一般认为降雨激发的泥石流的发生是前期降雨量和短历时雨强共同作用的结果^[2-5],即前期降雨量主要是提供水源,渐进润湿、软化岩土体,降低岩土体稳定系数,甚至能让岩土体达到饱和状态,造成斜坡上岩土体渐进破坏;短历时强降雨 (一般为 10 min 雨强 R_{10} 或 1 h 雨强 R_{60}) 起直接激发作用,给即将饱和或基本饱和土体一个强烈机械冲击及激发孔隙静、动水压力。斜坡上岩土体在较长前期降雨作用下受静动孔隙水压力、表面径流和岩土体本身自重的下滑力和岩土体抗滑力保持应力平衡状态,在较大的短历时雨强作用下,便打破这个平衡,促使岩土体稳定性系数迅速下降而失稳破坏,终致坡面泥石流发生。降雨对泥石流发生作用巨大,一场典型的形成泥石流的降雨组成如图 4 所示。

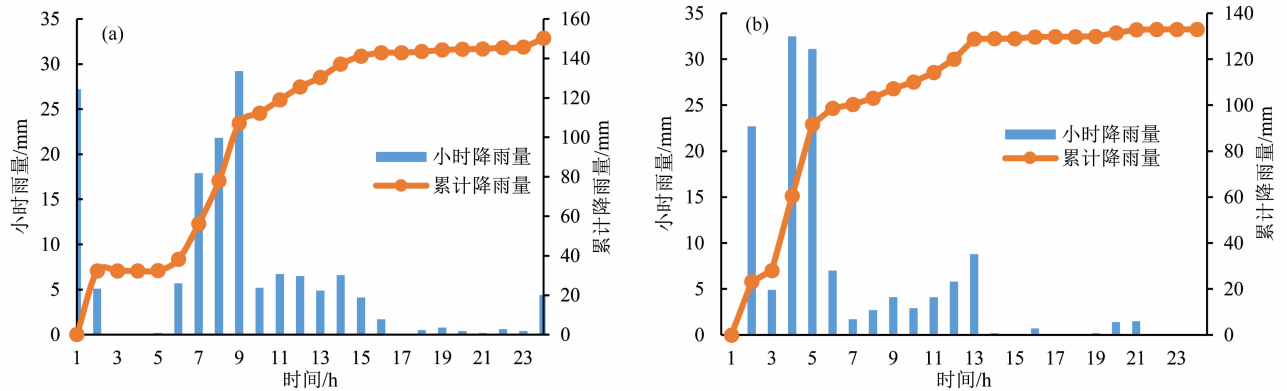
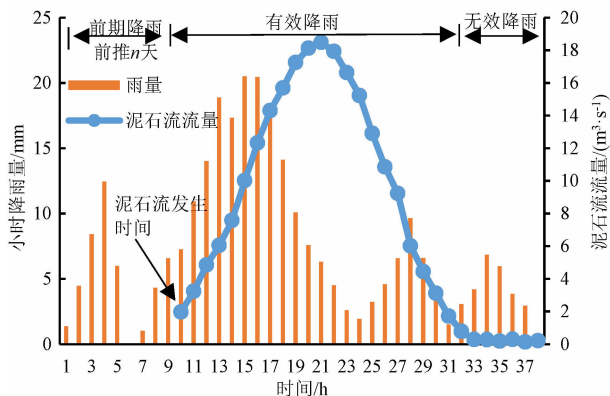


图 3 典型泥石流沟 24 h 降雨过程:(a)邵武晒口沟泥石流;(b)建阳下垵沟泥石流
Fig.3 24 h Rainfall process of debris flow:(a) Shaikou gully, in Shaowu;(b) Xiaqian gully, in Jianyang

表 1 两个典型坡面泥石流沟的主要特征
Tab.1 Characteristics of two typical debris flow on slope

沟谷	总体纵坡降/‰	流体重度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}$)	一次固体冲出量/ m^3	一次过程总量/ m^3
下垵沟	379 ~ 479	1.48 ~ 1.58	4.10 ~ 6.22	13.07 ~ 34.32	5600	11 000
晒口沟	1.43 ~ 1.45	5.67 ~ 7.53	30.91 ~ 97.47	5000	12 000	1.43 ~ 1.45

注:下垵沟泥石流发生时间为 2016 年 5 月 9 日上午 5 时,晒口沟泥石流发生时间为 2019 年 7 月 7 日上午 7 时,均属极低频次降雨坡面稀性泥石流。

图4 典型形成泥石流的降雨组成^[17]Fig. 4 Relationship between rainfall and debris flow occurrence^[17]

由图4可知,间接前期降雨为发生本次泥石流前 n 天泥石流沟域的降雨量,直接前期降雨指当场降雨中激发泥石流的短历时雨强前的降雨,二者合称为前期有效降雨。激发雨强为短历时强降雨,一般取1 h雨强或10 min雨强。有效降雨指从本次降雨开始到泥石流结束时的降雨,启动后降雨对泥石流形成作用不大,但它能增大泥石流的规模和历时。无效降雨指泥石流过程结束以后的本次后续降雨。

研究发现^[3-5,17],前期降雨量存在有效值问题,即泥石流发生前,松散物质的含水状况与临界启动前当日降雨量之间的关系密切,本文将两者合称为前期有效降雨量,它与研究区岩土体、气候、植被等关系密切,并不是一定时间的降雨量简单叠加,而是以一定的折减系数进行相加。

在泥石流预报研究中,当次降雨量依靠降雨预报获取,前期有效降雨量需要通过降雨监测数据的分析获取。然而,如何通过分析降雨监测数据获取前期有效降雨量则是十分困难的问题,目前还没有非常可靠的方法。文献^[17]根据蒋家沟实测降雨资料,分析泥石流形成的降雨组成和前期降雨对泥石流形成的影响,通过实测确定出该流域前期降雨量的衰减系数为0.78,并在对26场泥石流的降雨资料分析基础上,发现前期降雨在影响泥石流的各项降雨指标中贡献超过80%。文献^[18]定义前期有效降水量 $Ra = \sum_{i=1}^{14} a_i R_i$,其中 $a_i = 0.5^{t/T}$, R_i 为前第 t 天的降雨量, T 为降雨的半减期(单位为d),无论降雨大小对前期14 d内的降水进行线性叠加;日本多沿用此方法,不同在于系数及天数调整。

文献^[4]引入实效降雨量的概念,并定义模型为 $Ra = \sum_{i=1}^{14} a_i R_i$, $a_i = (0.5)^{t/2}$,认为14 d为影响日期,并定义了折减系数计算公式。文献^[19]提出了泥石流预报前期间接雨量计算公式,并建议递减系数取0.8~0.9,影响天数取20。云南蒋家沟泥石流灾害区则重点从土壤含水量衰减过程角度,通过野外观测的方法研究土力类泥石流预报中前期有效降水量的确定方法^[20]。从这些研究中可以看出,确定前期有效降雨量必须先解决2个难点,其一是确定前期降雨衰减系数,其二是确定前期降雨有效影响天数。

针对福建山区,文献^[21]认为8 d为主要影响天数,一般不大于7 d;文献^[3]认为降雨折减系数取0.84,然而该数值根据多位学者认为其并无实际物理意义,需要根据不同地区降雨和灾害进行具体分析确定^[22-25]。

3 降雨阈值模型的确立

已有关于泥石流降雨阈值模型的研究,可概括为单因子临界雨量模型和多因子临界雨量模型,国内外研究多采用后者。

本文采用多因子降雨量模型,综合考虑前期有效降雨和1小时激发雨强2个因子。

前期有效雨量计算公式为:

$$Re = kr_1 + k^2 r_2 + k^3 r_3 + \dots + k^n r_n \quad (1)$$

式中, Re 为前期有效降雨量(mm); k 为降雨折减系数(一般 $k < 1$); r_n 为泥石流发生前第 n 天的降雨量(mm)。

考虑雨量站多以1 h雨强作为记录,本文采用泥石流发生前的1 h雨量作为激发雨量,用 h_{60} 表示。

为研究福建地区泥石流形成时的激发雨量与前期有效雨量的关系,本文提出如下分析方法:

(1)剔除异常数据,对于单一地灾点可采用格拉布斯准则(Grubbs)^[24],特别是激发雨量(由于泥石流亲历者无法准确描述或者记录泥石流发生的时间),从而导致激发雨量出现偏差,并非真实的激发雨量;或者雨量站在台风暴雨作用下,强降雨条件下记录数据出现异常的情况;

(2)确定需要分析的前期有效降雨量的时间 n ,一般选8~14 d^[4,21];

(3)将激发雨量与前期有效降雨量进行统计,分别画散点图,然后利用凸包算法^[26-27]计算散点数据的外边界点,然后对外边界点进行数据连线或者数据拟合,得到根据已有数据获取的前期有效降雨与激发雨量的阈值线;

(4)利用最新数据对该拟合曲线进行修正及完善。

4 计算结果分析

根据工程经验和对泥石流灾害的基本认识,随着前期有效降雨量的增加,泥石流所需激发雨量则会不断减小,那么幂函数曲线最符合泥石流灾害的激发雨量与前期有效降雨的分布规律,即

$$f(h_{60}, Re) = h_{60} - a * Re^b \tag{2}$$

式中, h_{60} 为激发雨量(mm); a, b 为待定参数。

为研究福建地区泥石流降雨阈值,本文利用收集到的 2016—2019 年剔除异常降雨数据后的 15 个泥石流灾害事件(详见表 2)进行分析,参考文献[21]选取灾害发生前 8 天降雨作为前期有效降雨, k 值取 0.8,散点图以及通过凸包算法获得其外边界线详见图5。那么降雨阈值曲线的获取可以转换为

利用靠近坐标轴的外边界散点数据拟合的过程(即对散点①~④进行拟合)。以上操作可以对边界数据的精确识别选取,并避免人为选取不准的问题。

拟合后可以得到如下阈值曲线(图 6):

$$h_{60} = 38.93Re^{-0.12}, R^2 = 0.5799 \tag{3}$$

为了对该公式进行检验,利用韦方强^[28] 2010 收集的东南沿海的 14 d 前期有效数据进行对比分析(详见图 7),可以看出 14 d 与 8 d 前期降雨量预测公式相同,且东南沿海泥石流灾害事件(1982—2007)均落在该拟合的阈值曲线上方,可以满足预测和分析的目的。

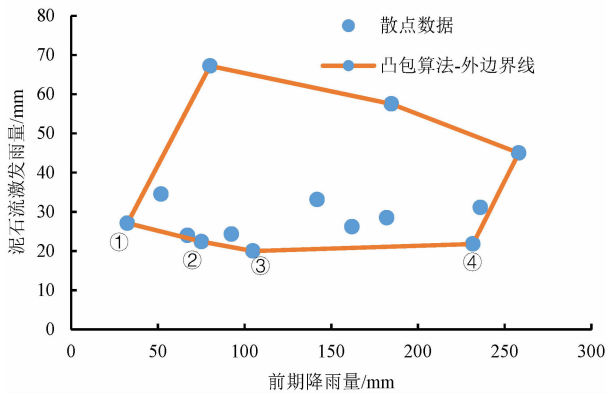
5 泥石流降雨阈值的影响因素分析

从泥石流的预测的机理上来说,降雨阈值需采用地形因子、物源因子和降雨因子综合分析才能确定,然而由于现有技术手段有限,地形常常因为植被覆盖等原因难以获取;物源也无法直接简单估测,需要采用现场钻探作业,费时费力;而降雨因子作为激发因素则可以进行测量,并且提前进行预测,从而可以为泥石流的预测提供最直接准确的预测手段。

表 2 泥石流事件一览表

Tab. 2 Debris flow events in Fujian province

编号	灾点名称	行政区划	经度	纬度	时间
1	下乾沟	南平市建阳区	117°31′	27°06′	2016-05-09 05:00
2	芦庵沟	三明市泰宁县	117°07′	26°42′	2016-05-08 05:00
3	三明紫连桥沟	三明市梅列区	117°38′	26°15′	2019-05-16 02:00
4	周厝沟	南平市武夷山市	118°13′	27°51′	2019-07-09 05:30
5	晒口沟	南平市邵武市	117°34′	27°18′	2019-07-07 07:05
6	演溪	三明市尤溪县	118°20′	26°20′	2018-06-05 18:00
7	东泉新村	三明市三元区	117°37′	26°14′	2020-06-01 14:00
8	棕南村	三明市梅列区	117°38′	26°19′	2019-08-17 13:00
9	列东街道高岩社区	三明市梅列区	117°38′	26°15′	2019-05-16 04:00
10	双溪村	宁德市福安市	119°30′	27°6′	2017-08-01 01:00
11	王乾村	南平市延平区	118°29′	26°37′	2017-04-21 06:22
12	新街村	三明市梅列区	117°43′	26°18′	2016-09-28 09:00
13	林坑村	泉州市南安市	118°25′	25°15′	2016-09-15 07:00
14	上埔村	福州市闽清县	118°52′	26°12′	2016-07-09 12:00
15	周墩新村	南平市松溪县	118°45′	27°46′	2016-05-09 08:00



注:激发雨量为泥石流发生时雨量;前期降雨量为泥石流发生前 8 天累计降雨量。

图 5 前期降雨量与泥石流激发雨量关系的散点图及外包曲线

Fig. 5 Scatter plot and outsourcing curve for the relationship of precedent effective precipitation and critical rainfall

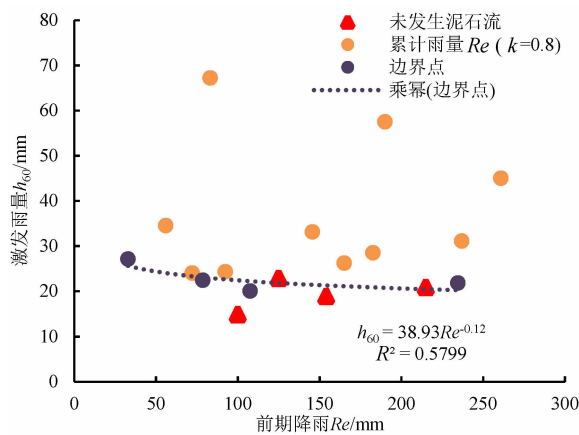


图 6 阈值曲线(前 8 天降雨量数据)

Fig. 6 Threshold curve (rainfall data of 8 days before events)

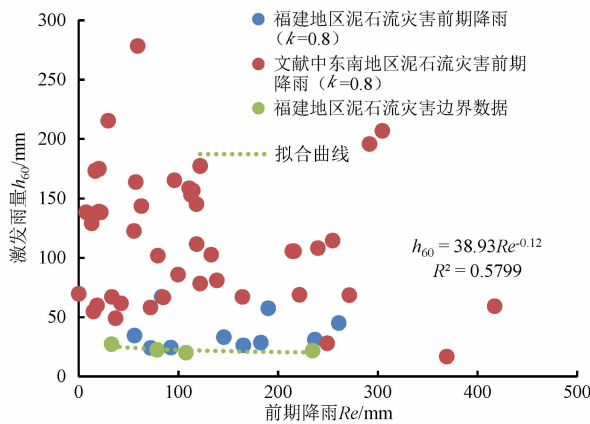


图 7 阈值曲线(前 14 天降雨量数据)

Fig. 6 Threshold curve (rainfall data of 14 days before events)

本文对福建地区下垵沟、晒口沟、芦庵沟和周厝沟 4 个未发生泥石流的雨场进行对比分析,可以发现,虽然本文的阈值曲线可以将大部分的灾害事件涵盖进来,但在同一泥石流发生流域(降雨量和地形条件相似),仍旧有部分沟谷和坡面未发生泥石流(详见图 8)。因此除了降雨量外,对于泥石流的降雨阈值还需考虑前期有效降雨折减系数 k 的取值,以及下垫面的影响。

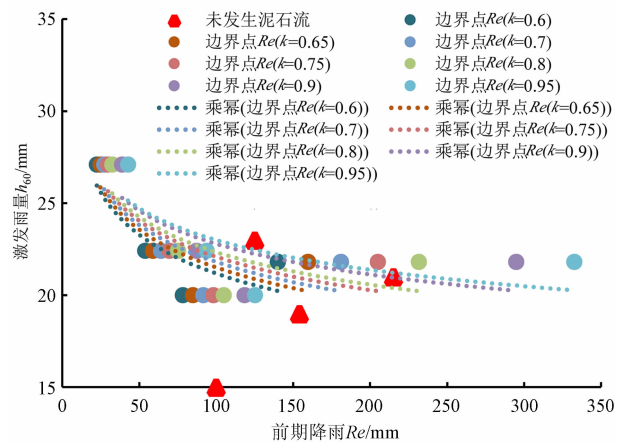


图 8 前期有效雨量与激发雨量的关系

Fig. 8 Relationship between early effective rainfall and induced rainfall intensity

(1) 折减系数的确定

由于有效降雨量 Re 根据降雨折减系数计算得来,而该取值需要根据具体降雨量和灾害的对应关系进行,参考以往文献及工程经验前人的经验,该折减系数 k 取值在 0.6 ~ 0.9 之间,常常取为 0.8。为对比不同 k 值对前期有效降雨量和泥石流起动的阈值曲线的影响,利用上文 15 条福建地区泥石流发生时雨场(2016—2019 年),取不同 k 值条件下对应的前期有效降雨量 Re 与激发雨量 h_{60} 的幂指数关系进行分析和计算(图 7),可以看出随着前期降雨量的增大,激发雨量不断减小。随着 k 值增加,趋势线向右移动。当 k 接近于 0.8 时,前期有效降雨量变化率减小,说明现有文献资料采用该值具有一定的实践意义。

(2) 下垫面特征

对于同一流域,降雨条件一致的条件下,相邻沟谷有的形成泥石流,而有的则并未形成泥石流,这是因为泥石流的形成除降雨因子外,还与物源条件、地

形条件有关^[23]。特别是对于东南沿海地区,海拔低、高差较小,虽然每年遭遇台风暴雨(强降雨)作用,但并非每次均形成泥石流。特别是近年来在多地发生低频型泥石流,这主要是因为历史上每次泥石流发生后,物源被携带出物源区再次形成泥石流需要物源的堆积,若物源量不足则仅仅形成高含沙水流或者洪水,并不会形成泥石流。这也是今后在东南沿海特别是福建地区进行泥石流形成机理研究需要考虑的因素。

(3) 其他因素

降雨阈值曲线一般用来预测泥石流的发生,然而在福建地区降雨类型除长时间强降雨类型外,还包含长时间小强度的降雨(连阴雨型)、短时强降雨型,今后还需根据降雨类型选择不同的预测模型和激发雨量,特别是针对不同的雨形进行预测,以达到精确预测的目的。

6 结论

(1) 福建山区泥石流类型主要为降雨坡面型泥石流,其发生受前期有效降雨量和短历时强降雨激发共同作用。结合福建山区特点,前期有效降雨量有效期可取 8 d,降雨强度折减系数可取 0.8,可采用 $f(h_{60}, Re) = h_{60} - 38.93$ 进行预测;通过与东南地区历史多次泥石流灾害数据进行验证得到该公式降雨阈值预测模型具有较好的预测效果;

(2) 建立了泥石流阈值拟合模型的分析方法,主要包含剔除无效数序,寻找外边界数据点及拟合和完善修正的流程,可为今后该领域模型的分析提供一定的依据;

(3) 降雨阈值预测模型不仅仅与降雨有关,还与下垫面的地形、物源量等存在一定密切联系,在今后可通过更多泥石流沟及其雨场得出更为准确的临界降雨曲线,为福建地区泥石流的预测和防治做更好支撑。

参考文献 (References)

[1] 叶龙珍,柳侃,黄国平,等. 福建重大地质灾害特征及其影响因素[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 98-102. [YE Longzhen, LIU Kan, HUANG Guoping, et al. The characteristics and influence factors of catastrophic geological disaster in Fujian province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 98-102] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.

1003-8035.2015.01.017

- [2] 潘华利,欧国强,黄江成,等. 缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2122-2126. [PAN Huali, OU Guoqiang, HUANG Jiangcheng, et al. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in data lack areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2122-2126] DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-7598.2012.07.031
- [3] 丛威青,潘懋,李铁锋,等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(21): 2808-2812. [CONG Weiqing, PAN Mao, LI Tiefeng, et al. Quantitative analysis of critical rainfall-triggered debris flows [J]. Chinese Journal Of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(21): 2808-2812] DOI: 10.3321/J. ISSN:1000-6915.2006.21.032
- [4] 谭万沛. 泥石流沟的临界雨量线分布特征[J]. 水土保持通报, 1989, 9(6): 21-26. [TAN Wanpei. Distribution characters of critical rainfall line for the debris flow gully [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(6): 21-26]
- [5] 谭炳炎,杨大文,石胜国. 暴雨泥石流预报的研究[J]. 铁道学报, 1992, 14(3): 92-101. [TAN Bingyan, YANG Dawen, SHI Shengguo. The study of prediction for debris flow caused by rainstorm [J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(3): 92-101]
- [6] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 1980, 62(1-2): 23-27. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1
- [7] GUZZETTI 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. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1
- [8] DZ/T 0220-2006. 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [DZ/T 0220-2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006]
- [9] 姚令侃. 用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 72-78. [YAO Lingkan. A research on the calculation of critical rainfall with frequency of debris flow and torrential rain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(4): 72-78]
- [10] 徐继维,于国强,张茂省,等. 舟曲地区泥石流降雨临界阈值, 2017, 35(1): 39-47. [XU Jiwei, YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, et al. Critical rainfall thresholds for debris flows in Zhouqu, China [J]. Mountain Research, 2017, 35(1): 39-47] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000194
- [11] 倪化勇,唐川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 606-613. [NI Huayong, TANG Chuan. Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 606-613] DOI: 10.14042/J. CNKI. 32.1309.2014.

- 04.005
- [12] 余斌,朱云波,刘秧. 坡面泥石流降雨预报模型[J]. 水科学进展, 2017, **28**(6): 839 – 848. [YU Bin, ZHU Yunbo, LIU Yang. Prediction model of hillslope debris flows [J]. Advances in Water Science, 2017, **28**(6): 839 – 848] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.005
- [13] 余斌,朱渊,王涛. 沟床起动型泥石流的 10min 降雨预报模型[J]. 水科学进展, 2015, **26**(3): 347 – 355. [YU Bin, ZHU Yuan, WANG Tao, et al. Research on the 10 – minute rainfall prediction model for debris flows [J]. Advances in Water Science, 2015, **26**(3): 347 – 355] DOI: 10.14042/J. CNKI. 32. 1309. 2015.03.006
- [14] 郭晓军,范江琳,崔鹏,等. 汶川地震灾区泥石流的诱发降雨阈值[J]. 山地学报, 2015, **33**(5): 579 – 586. [GUO Xiaojun, FAN Jianglin, CUI Peng, et al. Thresholds of rainfall triggering debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Mountain Research, 2015, **33**(5): 579 – 586] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000072
- [15] 狄靖月,许凤雯,李宇梅,等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, **34**(1): 62 – 67 + 93. [DI Jingyue, XU Fengwen, LI Yumei, et al. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in southeast [J]. Journal of Catastrophology, 2019, **34**(1): 62 – 67 + 93] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 811X.2019.01.013
- [16] 刘成,徐刚. 坡面泥石流活动与降水之间的关系初探——以重庆北碚地区为例[J]. 水文地质工程地质, 2006(4): 94 – 97. [LIU Cheng, XU Gang. A preliminary study of the relationship between debris flow on slope and precipitation——a case study in Beibei, Chongqing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(4): 94 – 97] DOI: 10.3969/j.cnki.issn.1000 – 3665. 2006.04.023
- [17] 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 – 13. [CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia Gully as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, **1**(1): 11 – 13] DOI: 10.16843/j.sswc.2003.01.006
- [18] 濑尾克美,原口腾则,菊井稔宏,等. 土砂灾害警戒避难基准雨量的课题和改良[J]. 砂防学会, 2001, **53**(6): 37 – 44. [SENOO K, HARAGUCHI K, KIKUI T, et al. On the theme and improvement of standard rain – fall of warning and evacuation from sediment disasters [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 2001, **53**(6): 37 – 44] DOI: 10.11475/sabo1973.53.6_37
- [19] 伍宇明,兰恒星,高星,等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. 工程地质学, 2014, **22**(2): 255 – 262. [WU Yuming, LAN Hengxing, GAO Xing, et al. Rainfall threshold of storm – induced landslides in typhoon areas: A case study of Fujian province [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(2): 255 – 262] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.02.012
- [20] 陈景武. 蒋家沟暴雨泥石流预报研究[G]//吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究,北京:科学出版社,1990:197 – 213. [CHEN Jingwu. Study on debris flow forecast in Jiangjia Gully [G]//WU Jishan, KANG Zhicheng, TIAN Lianquan, et al. Observation and research on debris flows in Jiangjia Gully in Yunnan, Beijing: Science Press, 1990:197 – 213]
- [21] 黄俊宝. 闽东南台风暴雨型滑坡成灾临界降雨量研究[C]. 杭州:“资源保障 环境安全——地质工作使命”华东六省一市地学科技论坛文集, 2011:226 – 229. [HUANG Junbao. The study on the critical rainfall of typhoon – type landslide disaster in Fujian southeast [C]. Hangzhou: Collection of Geoscience and Technology Forum of Six Provinces and One City in East China, 2011: 226 – 229]
- [22] 韦方强,胡凯衡,陈杰. 泥石流预报中前期有效降水量的确定[J]. 山地学报, 2005, **23**(4): 453 – 457. [WEI Fangqiang, HU Kaiheng, CHEN Jie. Determination of effective antecedent rainfall for debris flow forecast [J]. Mountain Research, 2005, **23**(4): 453 – 457] DOI: 10.3969/j.issn.1008 – 2786.2005.04.012
- [23] 高珊,刘爱鸣,黄志刚,等. 福建省强降水诱发地质灾害特征分析[J]. 福建地质, 2010(Z1): 64 – 71. [GAO Shan, LIU Aiming, HUANG Zhigang, et al. The character analysis on heavy rainfall inducing geological hazards in Fujian province [J]. Geology of Fujian, 2010(Z1): 64 – 71] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 3970.2010.z1.012
- [24] GLADE T, CROZIER M, SMITH P. Applying probability determination to refine landslide – triggering rainfall thresholds using an empirical “antecedent daily rainfall model” [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, **157**(6): 1059 – 1079. DOI: 10.1007/s000240050017
- [25] 刘国治. 福建省安溪县地质灾害防灾预警体系建设探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, **16**(2): 151 – 154. [LIU Guozhi. Study on geological hazards – prevention alarm systems construction Anxi county, Fujian province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, **16**(2): 151 – 154] DOI: 10.3969/j.issn.1006 – 4362.2005.02.009
- [26] 熊艳艳,吴先球. 粗大误差四种判别准则的比较和应用[J]. 大学物理实验, 2010, **23**(1): 66 – 68. [XIONG Yanyan, WU Xianqiu. The generalizing application of four judging criterions for gross errors [J]. Physical Experiment of College. 2010, **23**(1): 66 – 68] DOI: 10.3969/j.issn.1007 – 2934.2010.01.022
- [27] 毛鹏. 快速凸包计算实现及其应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013: 25 – 29. [MAO Peng. Fast convexhull computation implementation and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronics Science and Technology, 2013: 25 – 29]

[28] 韦方强, 江玉红, 杨红娟, 等. 东南地区泥石流活动与降水气候特征的关系[J]. 山地学报, 2010, **28**(5): 616 – 622. [WEI Fangqiang, JIANG Yuhong, YANG Hongjuan, et al. Relationship

between debris flow activity and precipitation characteristics in southeastern China [J]. Mountain Research, 2010, **28**(5): 616 – 622] DOI: 10.3969/j.issn.1008 – 2786.2010.05.015

Rainfall Threshold of Debris Flow in Fujian Mountainous Area, China

ZHANG Tianfeng^{1,2}, GUO Chaoxu^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention, Geological Engineering Survey in Fujian Province, Fuzhou 350002, China;

3. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fujian Academy of Building Research Co Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: Precedent effective precipitation and critical rainfall intensity are usually selected to constitute the early warning index of debris flow. An imperative approach to settle precedent effective precipitation is to inquire the number of days affected by precedent rainfalls and the rainfall attenuation coefficient on a daily basis. Now, extensive debris flows are posing great threats to the mountainous areas of Fujian province, China, which need extensive investigation on their mobilization model. In this study, the situation of debris flows in the mountainous areas of Fujian, China was generally addressed and all methods to determine precedent effective precipitation were documented. By comparing historical data of 8 – days and 14 – days of precedent rainfall, it was certain that 8 – days was a proper parameter serving as the influence period of precedent effective precipitation. By introducing the Grubbs criterion to eliminate anomalous data and using convex hull algorithm to find the outer boundary of scatter data, the power exponential relationship between precedent effective precipitation and 1 – hour critical rainfall was established. Moreover, according to the development characteristics of debris flows in Fujian, the influencing factors of rainfall threshold prediction model of debris flows and the future improvement direction were analyzed. According to the analysis, it could be concluded that the debris flow type in Fujian province was mainly slope debris flow type, and the threshold model $f(h_{60}, Re) = h_{60} - 38.93Re^{-0.12}$ (h_{60} , hourly precipitation; Re , precedent effective precipitation) based on precedent effective precipitation and short duration heavy rainfall could achieve good prediction effect for debris flow mobilization. The initiation of single gully debris flow was attributed not only to the rainfall of study area but more the underlying surface topography and geomaterial storage of underlying surface. This study can provide an improved method and idea for constructions of rainfall threshold models of debris flows in multi – vegetation covered areas of Fujian province.

Key words: mountainous areas of Fujian province; critical rainfall threshold; debris flow initiation conditions; precedent effective precipitation