

文章编号: 1000-7598-(2012) 07-2122-05

缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究

潘华利^{1,2}, 欧国强^{1,2}, 黄江成^{1,2,3}, 曹 波⁴(1.中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
3.中国科学院研究生院, 北京 100039; 4.长江水利委员会 长江工程建设局, 武汉 430010)

摘 要: 合理的雨量阈值指标是保障泥石流预警报准确性的关键, 对于研究泥石流形成机制、分析预测未来活动特点以及指导防治工程设计等方面均具有重要意义。由于国内山区大多数泥石流沟均无降雨和灾害资料, 目前国内外通行的实证法和频率计算法不能满足其泥石流预警报的需要。通过分析泥石流预警区的降雨条件、水文特征及下垫面条件, 提出了基于水力类泥石流起动机制来计算泥石流预警雨量阈值的方法。主要根据流域地形及松散固体物质等特征, 计算该流域泥石流起动的临界水深, 并结合流域产汇流机制、特征降雨量随海拔变化规律、暴雨雨型特征, 进而计算该流域泥石流预警雨量阈值。研究成果在四川省凉山州宁南县城后山史家沟流域进行了应用和验证, 结果表明该方法具有合理性和可行性。该方法解决了缺资料地区泥石流预警报的难题, 为山区泥石流预警报提供了一种新的思路。

关 键 词: 雨量阈值; 泥石流; 预警; 缺资料地区

中图分类号: TV 144

文献标识码: A

Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in data lack areas

PAN Hua-li^{1,2}, OU Guo-qiang^{1,2}, HUANG Jiang-cheng^{1,2,3}, CAO Bo⁴(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
4. Changjiang Project Construction Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Reasonable rainfall threshold index is the key to ensure accuracy of debris flow forewarning. It is significant for the study of the formation mechanism of debris flow, the prediction of the future activities characteristics and the guidance of the prevention and controlling engineering. Most of the mountain areas have few rainfall and hazards data; therefore, both the traditional demonstration method and frequency calculated method can't satisfied the debris flow forewarning. Through studying the characteristics of the forewarning regions, including the rainfall characteristics, hydrological characteristics, and underlying conditions, a method to calculate the rainfall threshold is put forward based on the initiation mechanism of hydraulic debris flow. Firstly, the critical water depth for the initiation of debris flows is calculated according to the topography conditions and physical characteristics of the loose solid materials. Then, the rainfall threshold is calculated combined with the mechanism of runoff yield and confluence, the change laws of rainfall with altitude, and the rainfall pattern. The results have been used in Shijia Gully in Ningnan city, Sichuan province; and it is shown that this method is reasonable and feasible. This method resolves the problem of debris flow forewarning in the data lack areas and provides a new thread for the debris flow forewarning in the mountain areas.

Key words: rainfall threshold; debris flow; forewarning; data lack area

1 引 言

对于暴雨型泥石流而言, 降雨量和降雨强度的大小, 是激发泥石流的决定性因素。在同一条泥石流沟中, 当无地震等极端事件发生时, 流域内沟床

条件在一定时期内, 可认为是相对稳定的, 而降雨条件和固体物质的储备分布在流域内存在一定的时空变化。对某一泥石流沟道, 泥石流是否发生, 决定于流域内的降雨条件及固体物质的储备和分布状况。因此, 在查清沟道内可形成泥石流的松散固体

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 长江上游水土保持重点示范区泥石流预警系统重点示范建设项目 (No. NSL/2009/C-3); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目; 国家自然科学基金面上项目 (No. 50979103)。

第一作者简介: 潘华利, 女, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事泥石流与泥沙研究。E-mail: phl0902@126.com

物质储备及分布的情况下, 利用降雨资料预警泥石流发生是国内外目前通行的一种方法。合理的雨量阈值指标是保障泥石流预警报准确性的关键, 对于研究泥石流形成机制、分析预测泥石流未来活动特点以及指导泥石流防治工程设计等方面均具有重要意义。

目前, 国内外通行的泥石流雨量阈值的研究主要有以下方法: (1) 实证法。该方法主要是通过对实际的降雨和泥石流灾害资料进行统计分析, 得出相应的前期有效降雨量和特征雨量(10 min、30 min、1 h 雨量等)之间的关系, 从而绘出雨量阈值曲线^[1-5]。该方法准确度高, 但需要有非常丰富的、长期的雨量序列资料和灾害资料, 因此, 仅适用于具有长期观测历史的地区, 如我国云南蒋家沟和日本烧岳等。

(2) 频率计算法。即对于雨量资料较丰富但灾害资料缺乏的山地城镇, 对泥石流雨量阈值的研究可在假设灾害和暴雨同频率的基础上, 通过计算暴雨的发生频率, 来计算相应的泥石流雨量阈值指标^[6-9]。也有部分学者根据泥石流起动条件分析了泥石流发生与降雨量、土壤含水率的关系^[10], 但却鲜见在泥石流雨量阈值中的应用^[6-9]。

对于我国山区, 尤其是西部山区, 绝大多数的泥石流沟远离城镇, 降雨和灾害资料均非常缺乏, 一旦暴发泥石流往往对下游村庄、农田、交通枢纽和水利设施等造成严重危害。对于此类灾害和雨量资料均缺乏的地区, 目前的“实证法”和“频率计算法”均不能满足当前泥石流预警报的要求。为解决上述难题, 本文选择与研究区具有类似条件且具有丰富资料的地区作为参考, 类比分析研究区的降雨特征, 利用水力类泥石流起动机机制法进行计算, 提出一种适用于缺资料地区泥石流预警雨量阈值的确定方法, 以期缺资料地区泥石流预警报提供科学依据。

2 研究区降雨时空分布特征分析

2.1 特征降雨量与高程关系

为了探讨研究区降雨量的时空变化规律, 以研究区为中心, 选取研究区附近雨量站资料, 进行降雨量时空分布特征分析。根据研究, 在一定范围内, 降雨量与高程之间存在相关关系。因此, 分析研究区及其临近区域雨量站的地理位置和特征降雨量(年均降雨量、雨季降雨量、日降雨量、小时降雨量等), 则可建立起相应的特征雨量与海拔相关关系。如

$$H = AI^a \quad (1)$$

式中: H 为高程(m); I 为特征降雨量(mm); A 为系数; a 为指数。

2.2 典型暴雨雨型分析

降水的缓急, 不仅影响径流形成, 同样也影响泥石流的形成和发展。因为不同的降雨, 将使土体含水率不同, 从而土体的内部结构、应力状况、抗蚀性、抗滑性等均有差异。总之, 不同的降水既影响清水产汇流, 也影响固体物质的补给。

根据降雨的缓急, 雨型大致可以分为两种: 平缓型和尖峰型, 如图1所示。在一次降雨过程中, 如果降雨强度的变化幅度较小, 在雨量过程线上没有明显的峰值, 则此种降雨类型可称为平缓型。相反, 如果在其中的某一段时间降雨强度突然增大, 而其他时间降雨强度较小, 在雨量过程线上有明显的峰值, 称此种降雨类型为尖峰型。对于这种尖峰型降雨, 在一次降雨过程中, 可能只有一次峰值, 也可能出现多个峰值; 从出现的位置上, 可能出现在降雨的前期, 也可能在中期或后期; 强降雨时间一般较短, 但也可能持续时间较长。根据现有的灾害资料, 引起泥石流发生的暴雨主要以尖峰型为主。因此, 在本文的分析中, 暴雨雨型主要利用尖峰型, 峰值的次数只考虑单峰型。

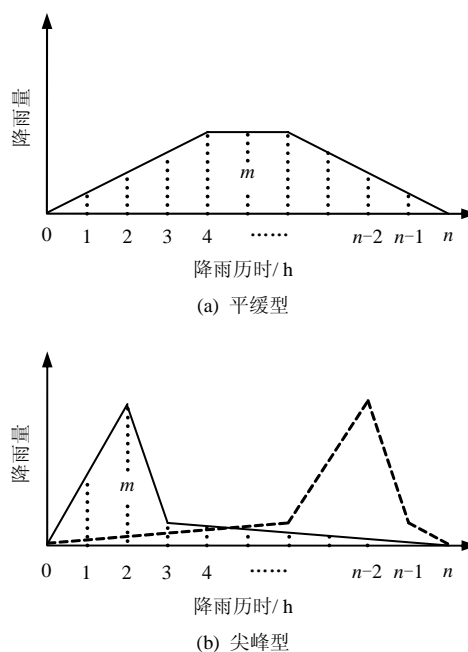


图1 典型暴雨雨型
Fig.1 Typical rain styles

2.3 前期影响雨量的计算

泥石流的激发是短历时暴雨和前期降雨量共同作用的结果^[6]。以往多处实测资料表明, 泥石流的激发多出现在降雨过程峰值降雨之中的某一时刻。

峰值雨量的持续时间一般较短,通常只有几分钟到几十分钟,这种短历时的峰值降雨在泥石流研究中被称作泥石流的激发雨量。不同短历时的暴雨均可以说明泥石流的激发雨量,通常选用 10 min 雨强或者 30 min 雨强、1 h 雨强等作为泥石流的激发雨量,需根据具体情况而定。本文的分析以 1 h 雨强为例。

前期影响雨量是指导致泥石流激发的 1 h 峰值雨量前的总降雨量,可以表示为

$$P_a = P_{a0} + R_t \quad (2)$$

式中: P_a 为泥石流的前期影响雨量 (mm); P_{a0} 为前期有效雨量 (mm); R_t 为激发雨量 (mm)。

激发雨量 R_t 是指 1 h 雨强前的本次 (日) 降雨过程的总降雨量,它直接影响固体补给物质的含水状况,直接参与泥石流的形成,因此

$$R_t = \sum_{t_0}^{t_n} r \quad (3)$$

式中: t_0 为本次 (日) 降雨过程的开始时间 t_n 为 1 h 雨强前的时间; r 为降雨量 (mm)。

前期有效雨量 P_{a0} 是指泥石流暴发日前对固体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。为了正确揭示固体补给物质含水率的实际情况,可采用下式:

$$P_{a0} = KP_1 + K^2 P_2 + K^3 P_3 + \dots + K^n P_n \quad (4)$$

式中: P_n ($n=1,2,3,\dots,n$) 为泥石流暴发前 n d 的逐日降雨量 (mm); K 为递减系数。

式 (4) 能相对说明泥石流暴发前 1 d 的固体物质含水率的情况,问题的关键在于递减系数 K 值的确定。在水文计算中, K 值为 0.8~0.9,可根据天气状况,如晴天、多云天和阴天的不同而确定恰当的 K 值。

一次过程的降雨量,经过 K 值的逐日递减,一般在 20 d 就基本耗尽。不同类型的暴雨泥石流沟,所需前期间接雨量的天数不同,根据泥石流激发雨量和前期雨量的关系而具体确定天数。一般暴雨型泥石流沟取到 20 d 前的降雨,大暴雨型泥石流沟取到 10 d 前的降雨即可,特大暴雨泥石流沟的激发,主要决定于本次降雨过程,前期降雨量可忽略不计。

3 水力类泥石流起动机制算法

3.1 水力类泥石流起动机制

图 2 为水力类泥石流起动机制分析图。根据高桥保^[11]提出的溪床堆积物泥石流,在堆积物的表面受水流作用时,发生泥石流的临界水深条件为

$$h_0 = \left[\frac{C_*(\sigma - \rho) \tan \varphi}{\rho \tan \theta} - \frac{C_*(\sigma - \rho)}{\rho} - 1 \right] d_m \quad (5)$$

式中: C_* 为堆积体的体积浓度,根据试验测定,当堆积体达到饱和时, $C_*=0.812$; σ 为砂砾密度,通常取 2.65 g/cm^3 ; ρ 为水密度,为 1.0 g/cm^3 ; θ 为沟床坡度; φ 为内摩擦角; d_m 为砂砾平均粒径 (mm), $d_m = (d_{16} + d_{50} + d_{84})/3$, d_{50} 为砂砾的中值粒径 (mm),即在粒径累积曲线上重量百分含量等于 50% 所对应的泥沙颗粒粒径,相应的 d_{16} 、 d_{84} 分别为粒径累积曲线上重量百分含量等于 16% 和 84% 所对应的泥沙颗粒粒径。

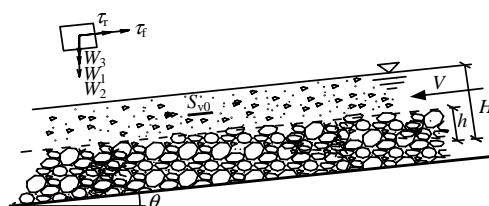


图 2 水力类泥石流起动机制分析图
Fig.2 Sketch of the start-up mechanism for hydraulic sort debris flow

W_1 表示沟床堆积土体可能移动层的有效重量 (g); W_2 为土体表面以上流体的重量 (g); W_3 表示沟床铺砂体中水的重量 (g); τ_r 为流动中颗粒间的流体剪切力 (N); τ_f 为流体在运动中相互碰撞产生的剪切力 (N); H 为流体的泥深 (m); S_{v0} 为入流流体的泥砂体积浓度; h 为可能移动的泥沙层厚度 (cm); V 为泥石流的平均流速 (m/s)。

通过对研究区地质条件、土壤性质等进行调查分析发现,研究区与云南东川蒋家沟同处于小江断裂带上,并且土壤类型和性质相似。通过利用大型直剪仪对蒋家沟泥石流源地土壤进行力学参数测定可知,砾石土的内摩擦角与泥沙的中值粒径之间存在如下关系^[12]:

$$\varphi = 1.273 2d_{50} + 19.807 \quad (6)$$

3.2 产汇流分析

我国山区的泥石流多发于 5~10 月份,与雨季相同。因此,在进行泥石流预报时,其产汇流方式可认为是“蓄满产流”。根据“蓄满产流”的原理,水量平衡方程表达式为

$$R = P - I = P - (I_m - P_0) \quad (7)$$

式中: R 为径流深 (mm); P 为一次降雨量 (mm); P_0 为降雨开始时的土壤含水率 (mm); I_m 为降雨结

束时流域达到的最大蓄水量 (mm) (对一特定流域, I_m 为常数); I 为一次降雨的损失量 (mm)。

3.3 泥石流雨量阈值

对泥石流进行雨量预警, 需要在泥石流沟流域内, 尤其是在泥石流形成区, 按照雨量站的布置原则布设至少一个雨量站。通过雨量站对流域降雨的实时观测资料, 通过式 (2)、(4) 可以得出前期影响雨量。在泥石流沟道内选取横断面, 根据水力类泥石流起动机, 由式 (5) 计算得出该断面泥石流起动所需要的临界水深, 则流域的平均流量为

$$Q = BVh_0 \quad (8)$$

式中: B 为沟道的宽度 (m)。

径流深是指在某一时段内的径流总量平铺在全流域面积上所得的水层深度。以 1 h 为单位, 则流域的径流深 R 可表示为

$$R = \frac{W}{1000F} = \frac{3.6 \sum Q \Delta t}{F} = \frac{3.6Q}{F} \quad (9)$$

式中: F 为流域面积 (km^2)。

以小时雨量进行泥石流预警报, 一次降雨量 P 改写为小时雨量 I_{60} 。同时, 降雨开始时的土壤含水率 P_b 即反映了泥石流的前期影响雨量 P_a , 式 (7) 可以写为

$$I_{60} + P_a = R + I_m \quad (10)$$

由上可知, 只要计算出径流深 R , $I_{60} + P_a$ 为一定值。也即是说, 当 $I_{60} + P_a$ 达到 $R + I_m$ 时, 就表明该泥石流沟即将发生泥石流。因此, 式 (10) 可以用来对泥石流的发生进行预警报。

4 实例分析

4.1 研究区概况

宁南县位于四川省凉山彝族自治州东南部, 地处北纬 $26^\circ 50'12'' \sim 27^\circ 18'34''$, 东经 $102^\circ 27'44'' \sim 102^\circ 55'09''$ 。县城坐落在泥石流堆积扇群上部, 西北、东北、东南三面环山而开口向西南。史家沟位于县城正后方, 流域面积为 1.639 km^2 , 其中, 形成区面积 1.077 km^2 , 主沟长 3670 m , 沟头到沟口高差 1420 m , 沟床纵比降 314% 。它与吴家沟在县城上方交汇后流入羊圈沟, 穿城而过。据现场考察, 史家沟内堆积了大量的松散固体物质, 遇到一定强度的降雨极易引发泥石流, 对县城安全构成严重威胁。

1991 年, 长江水利委员会在史家沟与吴家沟交汇点处设立了宁南县城后山泥石流监测预警点, 并

于 2010 年将其建设成了长江上游泥石流监测预警系统重点示范点 (下称预警站)。中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所对其雨量阈值系统进行了研究, 在史家沟流域内及预警点布置了 3 个雨量观测站, 分别为水井湾、官村子、预警站, 其相应高程分别为 2140 、 1670 、 1230 m 。

利用研究区附近 24 个雨量站 1964 年至 2005 年的降雨资料进行区域降雨特征分析, 建立了研究区日降雨量与海拔关系式为

$$H = 1.842I^{1.55} \quad (11)$$

4.2 起动法计算史家沟泥石流雨量阈值

通过野外调查获得的史家沟流域及固体物质性质资料, 利用式 (5) ~ (10), 计算了史家沟流域泥石流平均预警雨量阈值如表 1、2 所示。

表 1 史家沟流域泥石流起动临界水深计算结果

Table 1 Critical water depth of debris flow start-up in Shijia Gully

C_s	σ /(g/cm^3)	ρ /(g/cm^3)	$\tan \theta$	d_{16} /mm	d_{50} /mm	d_{84} /mm	ϕ /($^\circ$)	d_m /mm	h_0 /mm
0.812	2.67	1.0	0.314	0.14	1.70	7.20	21.97	3.01	5.91

表 2 史家沟流域雨量阈值计算表 (平均值)

Table 3 Rainfall thresholds of Shijia Gully (average values)

h_0 /mm	\bar{B} /m	V /(m/s)	Q /(m^3/s)	Δt /h	F / km^2	R /m	I_m /mm	$I_{60} + P_a$ /mm
5.91	23.3	3	0.42	1	1.6	0.94	90	90.94

4.3 各监测站点雨量阈值曲线的确定

由于该区域降雨资料缺乏, 尤其是几乎没有小时及更短历时的雨量资料记录, 因此, 采用日降雨量与海拔关系来表示小时降雨量随高程的变化关系。根据流域总面积、形成区面积及式 (11), 将表 2 的计算结果按比例推算到各个高程的观测点, 结果如表 3 所示。

表 3 史家沟雨量监测点雨量阈值表

Table 3 Respective rainfall thresholds of observation station in Shijia Gully

观测点	海拔 /m	形成区面积 / km^2	清水区面积 / km^2	$I_{60} + P_a$ /mm
水井湾	2140	1.077	0.562	95.76
官村子	1670	1.077	0.562	81.60
预警站	1230	1.077	0.562	67.00

与宁南县城后山史家沟泥石流暴发的雨量资料进行对比发现, 由本方法计算得出的泥石流雨量阈

值与实际灾害情况相符。表明本文提出的根据水力类泥石流启动机制来计算泥石流预警雨量阈值的方法合理可行。

5 结 论

(1) 在一定范围内,降雨量与高程之间存在相关关系。随着高程的增加,降雨量(包括年降雨量及短历时特征雨量)随高程以幂函数的关系增加。

(2) 泥石流的发生与降雨条件密切相关,主要受前期影响雨量和短历时特征雨量影响。以小时降雨量作为泥石流预警报指标为例,根据水力类泥石流启动机制和水文计算,当泥石流前期影响雨量和小时降雨量之和达到某一阈值时即可发生泥石流,该阈值即为泥石流预警报的雨量阈值。

(3) 如果研究区流域有灾害记录且有该次灾害的雨量资料,则可将该次灾害发生时对应的小时雨强和前期影响雨量点绘到各监测点的雨量曲线图中,对雨量阈值曲线进行验证和修正。

(4) 由于这些区域本就属于资料短缺地区,因此,短期内无法利用实测资料对雨量阈值曲线进行验证。但后期可以根据建立的泥石流雨量观测站的实测资料,对阈值曲线进行验证和修正,提高其准确度。

参 考 文 献

- [1] 白利平,孙佳丽,南赞. 北京地区泥石流灾害临界雨量阈值分析[J]. 地质通报, 2008, 27(5): 674—680.
BAI Li-ping, SUN Jia-li, NAN Yun. Analysis of the critical rainfall thresholds for mudflow in Beijing, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(5): 674—680.
- [2] 林星,郑章清,黄文俊. 东川地区降雨与泥石流关系的研究[J]. 路基工程, 2001, (4): 10—14.
- [3] 庄建琦,崔鹏,葛永刚,等. 降雨特征与泥石流总量的关系分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 77—83.
ZHUANG Jian-qi, CUI Peng, GE Yong-gang, et al. Relationship between rainfall characteristics and total amount of debris flow[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 77—83.
- [4] 田冰,王裕宜,洪勇. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系——以云南省蒋家沟为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 71—75.
TIAN Bing, WANG Yu-yi, HONG Yong. Weighted relation between antecedent rainfall and process precipitation in debris flow prediction—A case study of Jiangjia gully in Yunnan province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 71—75.
- [5] 植村昌一,恩田裕一,王丽. 与田切河的泥石流与降雨条件[J]. 水土保持科技情报, 1996, (2): 29—31.
- [6] 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 Ling-kan. 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.
- [7] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. 水利规划及设计, 2009, (2): 20—22.
- [8] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析——以黄河流域大通河支流为例[J]. 中国农村水利水电, 2008, 8: 63—65.
- [9] 梁光模,姚令侃. 确定暴雨泥石流临界雨量的研究[J]. 路基工程, 2008, (6): 3—5.
- [10] 胡明鉴,汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 824—828.
HU Ming-jian, WANG Ren. Testing study of the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia gully[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 824—828.
- [11] 高橋保. 土石流の発生と流動機構[J]. 土と基礎, 1978, 26(6): 45—50.
- [12] 魏厚振. 蒋家沟泥石流砾石土力学性状与启动过程分析研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所, 2008.

书 讯

富水复杂地质浅埋暗挖隧道修建技术

作者: 刘建国, 16 开本, 定价: 60 元, 版印次: 1 版 1 次, 出版日期: 2012-06-11, ISBN: 978—7—114—09773—7。

全书共 8 章, 内容包括: 1. 浅埋暗挖隧道技术概论; 2. 深圳地区工程地质与水文地质特点; 3. 深圳地区浅埋暗挖隧道综合技术; 4. 浅埋暗挖隧道防水关键技术; 5. 浅埋暗挖隧道监控量测及实时监测技术; 6. 浅埋暗挖隧道工程建设风险管理; 7. 工程实例; 8. 经验总结。

(摘自 中国交通书城)