

文章编号: 1008-2786-(2017)1-39-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000194

## 舟曲地区泥石流降雨临界阈值

徐继维<sup>1 2 3</sup>, 于国强<sup>2 3\*</sup>, 张茂省<sup>2 3</sup>, 丛凯<sup>4</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 国土资源部 黄土地质灾害重点实验室, 西安 710054;

3. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 西安 710054; 4. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050)

**摘 要:** 合理的降雨阈值是确定区域暴雨泥石流减灾防灾的关键。为了探求诱发舟曲地区泥石流的降雨阈值, 本研究以舟曲三眼峪、罗家峪为例, 研究了在前期含水量一般(湿润)和干旱两种条件下, 触发不同预警级别泥石流的降雨雨强与历时函数关系, 采用水文学方法计算了不同频率下洪峰流量以及对应的不同规模泥石流启动降雨量阈值。结果表明: 在前期含水量干旱和一般条件下, 三眼峪、罗家峪泥石流红色 I 级降雨预警值为 56.10 mm/h 和 50.86 mm/h、橙色 II 级预警值为 40.70 mm/h 和 37.87 mm/h、黄色 III 级预警值为 31.74 mm/h 和 29.88 mm/h、蓝色 IV 级预警值为 23.83 mm/h 和 21.69 mm/h、预备 V 级预警值为 7.31 mm/h 和 15.69 mm/h、预备 VI 级预警值为 10.16 mm/h 和 9.48 mm/h; 不同预警级别条件下的降雨雨强与降雨历时成  $I = \alpha \times D^\beta$  幂函数关系, 和数值在不同预警级别下成规律性变化; 能够诱发舟曲地质灾害的降雨特征可分为两种: 一是降雨雨强大的单峰型短历时强降雨(“点雨”); 二是降雨雨强小、持续时间较长的“绵绵细雨”。研究成果可作为舟曲区域暴雨泥石流监测预警研究提供科学依据。

**关键词:** 舟曲; 水文学; 泥石流; 触发降雨; 临界阈值

**中图分类号:** P642

**文献标志码:** A

舟曲“8.8”特大泥石流灾害造成的损失历史罕见。暴雨是本次泥石流灾害发生的动力来源, 也是泥石流形成的主要诱发因素。利用降雨数据进行泥石流灾害预警, 是国内外通行的一种方法。确定合理的降雨阈值是保障泥石流预警准确性的关键, 对于分析预测泥石流活动, 指导泥石流防治工程设计等方面均具有重要意义。

降雨是滑坡与泥石流发生的触发因素。学者一直致力于研究降雨临界阈值这一具有科学和社会意义的难题<sup>[1-5]</sup>。临界阈值可以定义为降雨、土壤水

分、水文条件等因素达到或超过某一数值时, 可能诱发地质灾害。降雨阈值可以由物理模型或经验模型定义。其中, 物理模型包括过程基础模型和概念模型, 经验模型包括历史模型和统计模型<sup>[1-8]</sup>。过程基础模型已被广泛应用于地质工程领域<sup>[1]</sup>。为了使降雨模式和历史数据融入到斜坡稳定/不稳定条件中, 过程基础模型引入了入渗模型<sup>[1-8]</sup>。该模型可以确定触发斜坡失稳的降雨量、发生位置和发生时间。经验降雨临界阈值可由导致滑坡发生的降雨事件来定义。建立预测降雨诱发斜坡失稳发生的

收稿日期(Received): 2014-08-09; 改回日期(Accepted): 2015-04-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41302224); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KJXX-20); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2012JQ5001, 2015JM4129) [National Natural Science Foundation of China (41302224); Shaanxi Province Science and Technology Research and Development Program of China (2014KJXX-20); Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (2012JQ5001, 2015JM4129)]

作者简介(Biography): 徐继维(1987-), 男, 辽宁阜新, 博士研究生, 主要从事地质灾害研究、风险评估研究 [Xu Jiwei (1987-), Male, born in Fuxin, Liaoning province, Ph. D., research on geologic hazard and risk assessment] E-mail: xujiwei@chd.edu.cn

\* 通信作者(Corresponding author): 于国强(1979-), 男, 内蒙古包头, 博士后, 从事土壤侵蚀与水土保持及地质灾害等方面的研究 [Yu Guoqiang (1979-), Male, born in Baotou, Inner Mongolia, Ph. D., research on soil erosion, water and soil conservation and geologic hazard] E-mail: yuguoqiang23@163.com

可能性的经验模型的关键,在于对降雨雨强和降雨历时的准确定义<sup>[1]</sup>。

舟曲处于高山峡谷区域,缺少充分的降雨数据和灾害资料,确定降雨临界阈值存在一定的困难。本研究在吸取经验模型的基础上,借鉴水文学产汇流计算方法,通过计算不同频率的洪峰流量,反求对应频率下的降雨特征数值,从而计算相应的触发泥石流降雨阈值,为高山峡谷地区泥石流流预警提供科学依据。

## 1 区域概况与研究方法

舟曲流域属高山峡谷区,地形复杂,高差悬殊,气候垂直变化明显;海拔较低的河川地带,气候温和湿润,高山地带则较为寒冷,随海拔升高,沟谷气候由亚热带逐步转变为温带,降水量也明显增大。据舟曲县气象局统计资料,区内多年平均降雨量为 435.8 mm,年最大降雨量 579.1 mm,年最小降雨量 253 mm,降水主要集中在 5~10 月份,且多以暴雨形式降落。有历史记录以来,特大山洪泥石流之前记录的 3h 最大降水量为 62.9 mm,雨强为 21 mm/h;

60 min 最大降雨量为 40.7 mm,雨强为 40.7 mm/h; 30 min 最大降雨量 38.1 mm,雨强为 76.2 mm/h; 10 min 最大降雨量 24.0 mm,雨强为 144 mm/h; 5 min 最大降雨量 25.0 mm,雨强为 300 mm/h。

### 1.1 舟曲“8.8”泥石流降雨时空分布特征

极端强降雨是舟曲“8.8”特大山洪泥石流的直接诱发因素,为泥石流的形成提供了强大的水动力条件。本研究涉及的降雨数据均来自于距离强降雨区最近的东山乡区域气象站监测资料,一定程度上反映三眼峪、罗家峪地质灾害发生时实际降雨情况,具有较好的空间匹配关系。另外,本研究的结果验证,也来自该气象站资料。

根据舟曲县城气象站监测数据显示,2010 年 8 月 7 日夜强降雨出现在舟曲县城以北(三眼峪、罗家峪)地区。此时舟曲县城持续 6 小时的降雨过程仅为 12.8 mm;位于县城东北 15 km 处的东山乡区域气象站(图 1),监测到自 1972 年建站以来监测到的最强降雨:到 7 日 22 时至 23 时一小时降雨量为 77.3 mm;降雨总时长为 9h,降雨量累计为 96.3 mm<sup>[9-12]</sup>。

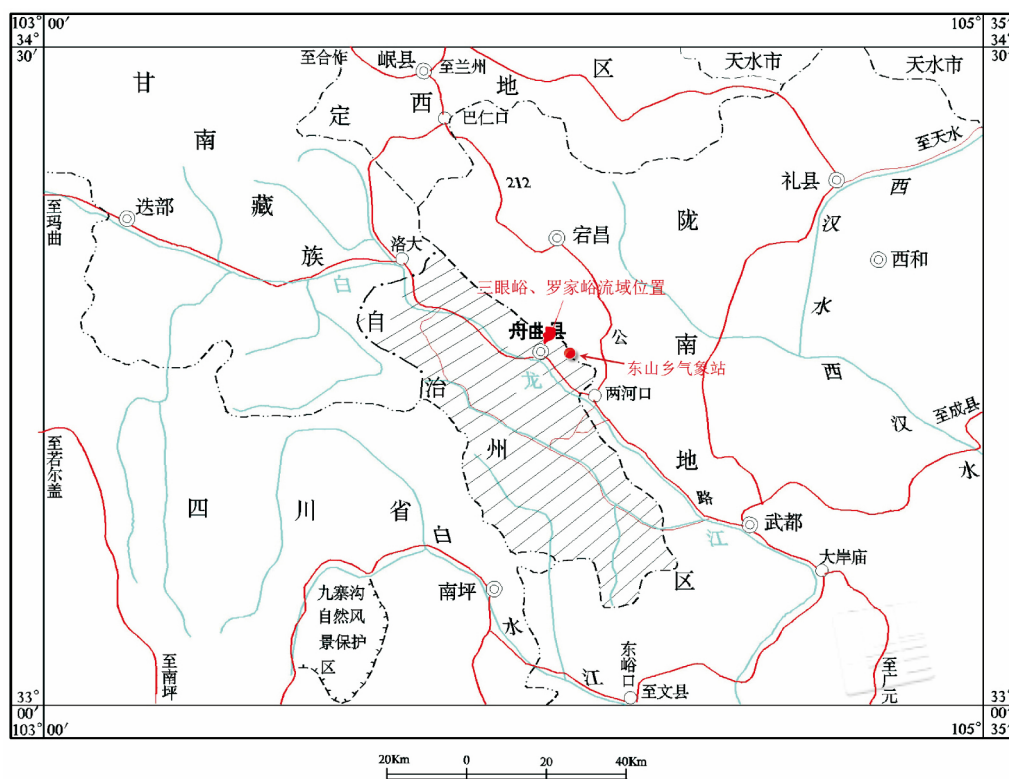


图 1 三眼峪、罗家峪及东山乡气象站位置图

Fig. 1 Locations of Sanyanyu watershed, Luojiayu watershed and Dongshanxiang weather station in Zhouqu County

灾后调查表明,暴雨区域集中于三眼峪沟中上游峪大眼峪支沟——罐子坪以上的范围,面积 $17.27\text{ km}^2$ ,占流域总面积的 $71.6\%$ 。暴雨区域内,坡面冲蚀及沟道汇流印痕明显。在罐子坪下游,未形成明显的地表径流冲刷迹象,坡下堆积的细粒松散物质也未见冲蚀。这说明,激发此次特大泥石流灾害的暴雨,具有局地性强、降水区域集中、产流迅速、分界明显、空间分布极不均一的特点<sup>[9-12]</sup>。另外,该流域灰岩组成的谷坡渗透能力差,植被涵养能力差,坡面径流汇集转化为沟道洪流,为泥石流启动创造了良好的水动力条件。

## 1.2 暴雨型泥石流流量计算

我国山区的泥石流多发于5~10月份,与雨季相同。泥石流预报可采用水量总量原理,其水量平衡方程表达式为<sup>[13,14]</sup>:

$$R = P - I = P - (I_m - P_b) \quad (1)$$

式(1)中: $R$ 为径流深(mm),代表水量流出量; $P$ 为一次降雨量(mm),代表水量总量; $I$ 为一次降雨的损失量(mm); $I_m$ 为降雨结束时流域达到的最大蓄水量(mm)(确定流域, $I_m$ 为常数); $P_b$ 为降雨前期的土壤含水率(mm)。

进行1h雨量泥石流预警报,可将一次降雨量 $P$ 改写为小时雨量 $I_{60}$ 。降雨前期土壤含水率 $P_b$ 即反映了泥石流的前期影响雨量 $P_a$ ,式(1)可以写为

$$I_{60} + P_a = R + I_m \quad (2)$$

由式(2)中 $I_{60} + P_a - I_m$ 超过径流深 $R$ 时,表明即将发生泥石流,因此,计算出相应的径流深 $R$ ,就可以计算出泥石流发生时所对应的降雨特征,发出预警信息。

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1h为单位,则流域的径流深 $R$ 可表示为:

$$R = \frac{3.6 \sum Q \Delta t}{F} = \frac{3.6Q}{F} \quad (3)$$

式(3)中: $Q$ 为流域出口洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ), $F$ 为流域

面积( $\text{km}^2$ )。

对一特定流域,降雨结束时流域达到的最大蓄水量 $I_m$ 为常数,反映了流域下垫面蓄水能力,也反映了降雨转化径流的能力。净雨强度(即径流强度)与暴雨强度的比值,即占的比例为径流系数。用符号 $C$ 来表示,则

$$C = \frac{R}{R_{\text{总}}} = \frac{R}{R + I_m} \quad (4)$$

所以,总降雨量 $R_{\text{总}}$ 可以通过 $C$ 和 $R$ 求得,即

$$R_{\text{总}} = \frac{R}{C} = \frac{3.6Q}{CF} \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 舟曲三眼峪、罗家峪洪水特征值确定

#### 1) 洪峰流量 $Q$

选取1954~2001年48年间舟曲县城上游立节站实测年最大洪峰流量数据,用矩法初估统计参数,采用 $P$ -Ⅲ型曲线,用适线法,求得立节站的洪峰流量均值为 $Q_m = 403\text{ m}^3/\text{s}$ , $C_v = 0.54$ , $C_s = 4.0C_v$ 。

舟曲县城瓦厂桥断面与立节水文站区间面积仅占瓦厂桥断面集水面积的 $9.7\%$ ,故以面积指数关系推算舟曲县城的设计洪峰流量。依据该河段历史洪水调查资料分析, $n$ 值在 $0.75 \sim 0.82$ 之间变化,本次取指数 $n = 0.8$ 。采用《小流域暴雨洪峰流量计算》方法<sup>[15,16]</sup>,计算舟曲三眼峪、罗家峪沟道不同频率的清水洪峰流量 $Q$ ,按照式(3)确定对应的径流深 $R$ ,计算结果如表1所示。

#### 2) 径流系数 $C$

径流系数 $C$ 与流域下垫面地质环境背景条件、土壤损失系数、流域面积与产流时间有关。由于舟曲地区以碳酸盐岩为主,风化程度差,在坡面局部低洼处有很薄的碳酸盐岩风化物(红粘土)及很薄的风积层存在。曾经是土层薄的一般森林地区,但现在仅有少量人工幼林。这基本与文献<sup>[15,16]</sup>中第Ⅱ类

表1 三眼峪、罗家峪不同频率下洪峰流量和径流深计算结果

Tab. 1 Flood peak discharge and runoff depth results at different frequencies in Sanyanyu and Luojiayu

流域名称	降雨频率	2%	3.33%	5%	10%	20%	50%
面积	重现期	50年	30年	20年	10年	5年	2年
三眼峪 $24.1\text{ km}^2$	洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	255.37	182.55	136.00	97.30	67.22	38.07
	径流深 $R$ (mm)	38.15	27.27	20.32	14.53	10.04	5.69
罗家峪 $16.1\text{ km}^2$	洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	174.50	129.31	98.90	71.60	49.93	28.50
	径流深 $R$ (mm)	39.02	28.91	22.11	16.01	11.16	6.37

相符。由于舟曲年降雨量不大 蒸发量大于降雨量，所以前期含水量土壤一般处于较为干旱或者一般状态(中湿状态)，所以土壤损失系数值  $L$  选取 0.76 或 0.63；根据实际观测或计算所得的暴雨参数(雨力)  $S$ ，查询实际径流系数  $C$  值(表 2)。

2.2 舟曲三眼峪、罗家峪泥石流降雨总量阈值

按照式(5) 确定不同预警级别下泥石流启动的降雨量阈值。按照土壤前期含水量一般(中湿)、干旱两种情况计算。由于径流系数与单位时间内(1h)降雨量有关，所以在径流系数  $C$  选取过程中，通过试算法多次计算单位时间内(1 h)的降雨量。

根据降雨特征、地质灾害启动机理、演化过程、危害程度及规模，以及降雨可能导致泥石流发生的

概率和致灾范围和强度，将重现期 50 年、30 年、20 年、10 年的暴雨分别界定为红色(Ⅰ级)预警、橙色(Ⅱ级)预警、黄色(Ⅲ级)预警、蓝色(Ⅳ级)预警四个预警级别；同时将重现期为 5 年、2 年的暴雨界定为Ⅴ级、Ⅵ级两个预备预警级别。其计算和界定结果如表 2 所示，同时也绘制三眼峪、罗家峪在土壤前期含水量一般(中湿)、干旱两种情况下，不同预警级别的小时降雨量曲线(图 2)。

由表 2 和图 2 可知，土壤前期干旱时的泥石流启动降雨阈值大于前期一般和湿润情况。这是因为前期干旱时，降雨入渗至饱和超渗产流，需要更多的水分。

从图 1 可以看出，在前期一般和干旱两种条件

表 2 三眼峪、罗家峪不同预警级别的泥石流小时降雨量阈值

Tab. 2 Hourly rainfall thresholds for debris flows at different early warning levels in Sanyanyu and Luojiayu

流域名称	预警级别	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级预备	Ⅵ级预备
前旗土壤含水量一般: $L=0.63$							
三眼峪	径流系数 $C$	0.75	0.72	0.68	0.67	0.64	0.6
	小时降雨量( mm/h)	50.86	37.87	29.88	21.69	15.69	9.48
	前旗土壤含水量干旱: $L=0.76$						
	径流系数 $C$	0.68	0.67	0.64	0.61	0.58	0.56
罗家峪	降雨总量( mm/h)	56.10	40.70	31.74	23.83	17.31	10.16
	前旗土壤含水量一般: $L=0.63$						
	径流系数 $C$	0.79	0.77	0.75	0.74	0.72	0.7
	降雨总量( mm/h)	49.39	37.55	29.49	21.64	15.51	9.10
罗家峪	前旗土壤含水量干旱: $L=0.76$						
	径流系数 $C$	0.74	0.73	0.7	0.68	0.65	0.63
	降雨总量( mm/h)	52.73	39.61	31.59	23.54	17.18	10.11

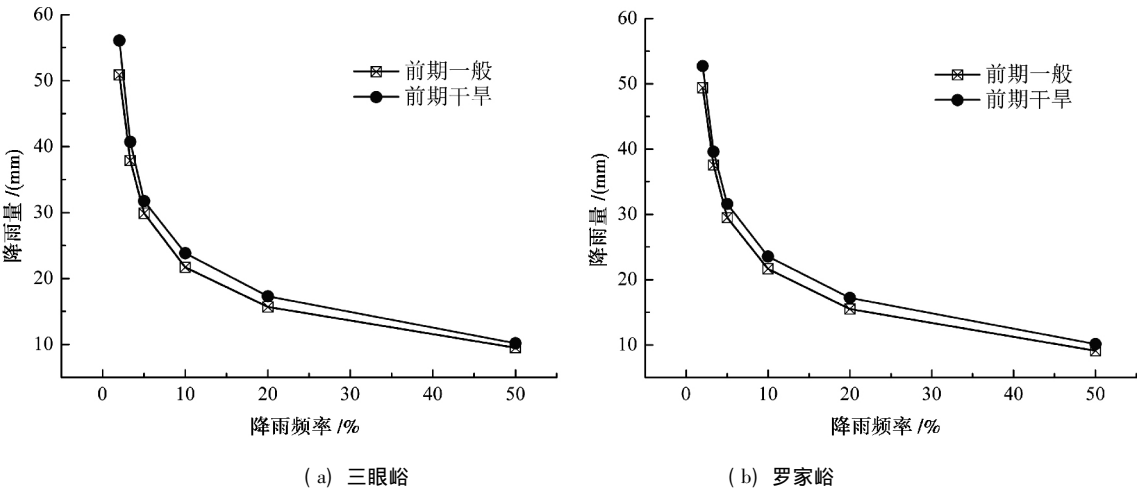


图 2 三眼峪、罗家峪流域不同频率(不同预警级别)下的小时降雨量

Fig. 2 Hourly rainfall at different frequencies (different early warning levels) in the Sanyanyu and Luojiayu

下的降雨阈值差距不是十分显著。这是流域的下垫面情况所致。舟曲属于高山峡谷地区,该地区地质由志留系板岩和千枚岩,二叠系灰岩和泥盆系灰岩和石板组成,以碎石土为主,颗粒物较大,降雨入渗速度较快,导致地表浅层含水量在前期干旱和一般时相差不大,所以触发泥石流启动的降雨阈值相差不是十分明显。另外,随着降雨(洪峰)频率的降低,重现期间隔增大,1 h 内降雨量升高。

2.3 舟曲泥石流降雨阈值函数关系、数值对应关系研究

舟曲历年极端降雨特征曲线(降雨雨强与降雨历时关系)及拟合曲线,如图 3 所示。

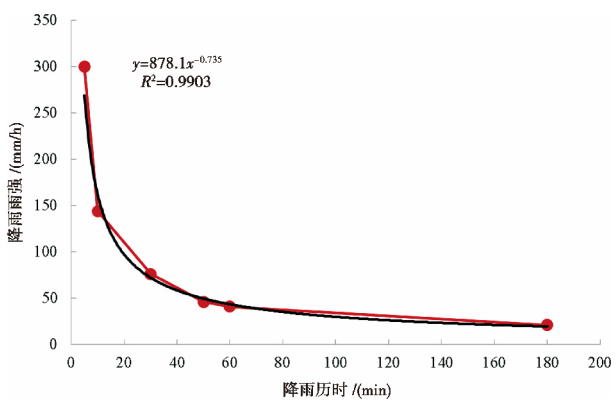


图 3 舟曲历年极端降雨特征曲线及拟合关系  
Fig. 3 Extreme rainfall characteristic curve and fitting relationship for past years in Zhouqu

从图 3 中可以看出,舟曲极端降雨条件下,降雨雨强与降雨历时关系呈幂函数下降趋势。对历年极端降雨特征进行拟合,拟合函数呈幂函数形式,幂函数为  $I = \alpha \times D^\beta = 878.1 \times D^{-0.735}$ ,确定性系数 ( $R^2$ ) 为 99.03%,拟合效果良好。图 3 可以看出,降雨历时为 60 min 时,雨强为 40.7 mm/h,等同于三眼峪

30 年一遇洪水时的小时雨量(降雨雨强),此时幂函数的指数为常数  $-0.735$ 。考虑 2% 降雨频率下,降雨特征(雨型)较 30 年一遇降雨更加陡急,单位时间降雨量更大这一特征,将 50 年一遇降雨的降雨雨强与降雨历时的幂函数关系指数  $\beta$  设定为  $-0.85$ ; 3.3% 降雨频率下的降雨雨强与降雨历时的幂函数关系中的指数  $\beta$  设定为  $-0.735$ ,而高于 3.33% 降雨频率的降雨条件下,降雨特征(雨型)较 30 年一遇降雨比较平缓,单位时间降雨量略小,依次将 5%、10%、20%、50% 降雨频率下的降雨雨强与降雨历时的幂函数关系中的指数  $\beta$  设定为  $-0.70$ 、 $-0.65$ 、 $-0.60$  和  $-0.50$ 。

以单位小时雨量(雨强)计算结果(表 2)和上述不同降雨频率下的幂函数指数为基础,对不同预警级别、前期含水量一般和干旱条件下,降雨雨强和降雨历时的幂函数系数  $\alpha$  进行修正,根据修正结果,确定了舟曲三眼峪、罗家峪在前期含水量一般(中湿)和干旱条件下,不同预警级别条件下,降雨雨强与降雨历时的幂函数关系,如表 3、4 所示。通过实际监测出的降雨雨强与降雨历时数值,对照表 3、4,可以确定泥石流发生的预警级别。但是,表中幂函数指数  $\beta$  是由舟曲有限极端降雨资料得出,和实际情况仍存在一定的偏差,还需要今后对降雨数据继续积累,进行不断修正。

依据表 3,绘制出舟曲三眼峪、罗家峪在前期含水量一般(中湿)和干旱两种条件下,泥石流不同预警级别下的降雨雨强和降雨历时的函数关系曲线,如图 4、5 所示。

图 4、5 列举了三眼峪、罗家峪小流域前期含水量在一般和干旱条件下,不同预警级别的降雨雨强与降雨历时函数关系。可以看出,能够触发舟曲地质灾害发生的降雨特征具有两种特征:一是降雨雨

表 3 三眼峪不同预警级别的泥石流降雨雨强与降雨历时函数关系

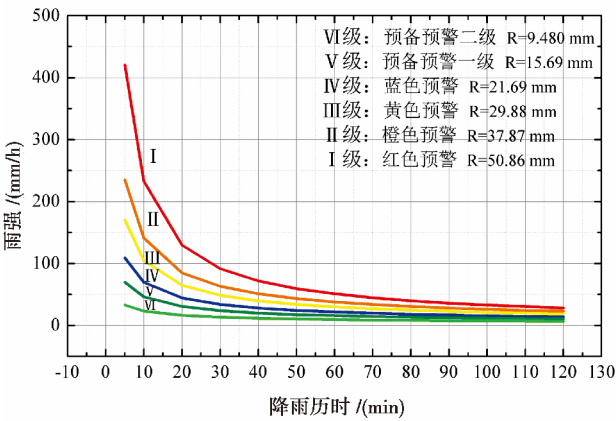
Tab. 3 Functional relationship between rainfall intensity and duration for debris flows at different early warning levels in Sanyanyu

前期 情况	预警 级别	函数关系 ( $I$ : 降雨雨强( mm/h) $D$ : 降雨历时( min) )	前期 情况	预警 级别	函数关系 ( $I$ : 降雨雨强( mm/h) $D$ : 降雨历时( min) )
前 期 一 般	Ⅵ	$I = 73.43 D^{-0.50}$	干 旱	Ⅵ	$I = 78.70 D^{-0.50}$
	Ⅴ	$I = 183.03 D^{-0.60}$		Ⅴ	$I = 201.92 D^{-0.60}$
	Ⅳ	$I = 310.50 D^{-0.65}$		Ⅳ	$I = 341.13 D^{-0.65}$
	Ⅲ	$I = 524.91 D^{-0.70}$		Ⅲ	$I = 557.59 D^{-0.70}$
	Ⅱ	$I = 767.78 D^{-0.735}$		Ⅱ	$I = 825.16 D^{-0.735}$
	Ⅰ	$I = 1\,651.22 D^{-0.85}$		Ⅰ	$I = 1\,821.34 D^{-0.85}$

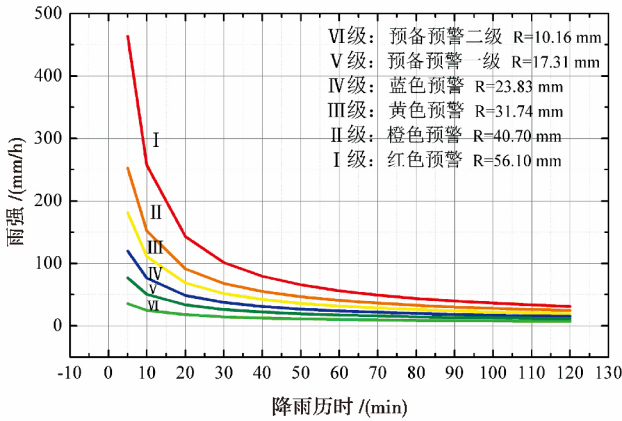
表 4 罗家峪不同预警级别的泥石流降雨雨强与降雨历时函数关系

Tab. 4 Functional relationship between rainfall intensity and duration for debris flows at different early warning levels in Luojiayu

前期 情况	预警 级别	函数关系 ( <i>I</i> : 降雨雨强( mm/h) , <i>D</i> : 降雨历时( min) )	前期 情况	预警 级别	函数关系 ( <i>I</i> : 降雨雨强( mm/h) , <i>D</i> : 降雨历时( min) )
前 期 一 般	VI	$I = 70.49 D^{-0.50}$	前 期 干 旱	VI	$I = 78.31 D^{-0.50}$
	V	$I = 180.93 D^{-0.60}$		V	$I = 200.41 D^{-0.60}$
	IV	$I = 352.73 D^{-0.65}$		IV	$I = 336.98 D^{-0.65}$
	III	$I = 518.06 D^{-0.70}$		III	$I = 554.95 D^{-0.70}$
	II	$I = 761.29 D^{-0.735}$		II	$I = 803.06 D^{-0.735}$
	I	$I = 1\ 603.49 D^{-0.85}$		I	$I = 1\ 711.93 D^{-0.85}$



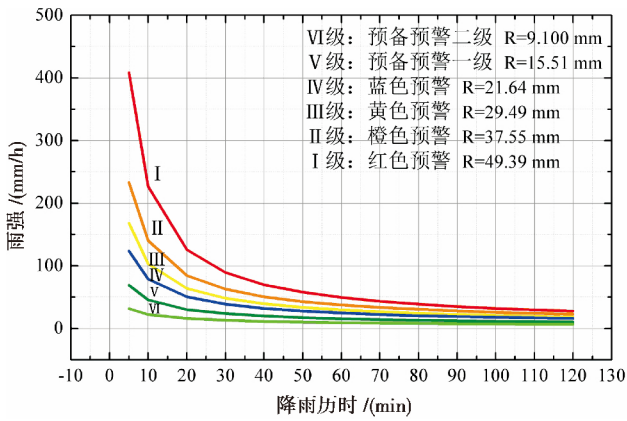
(a) 前期含水量一般(中湿)



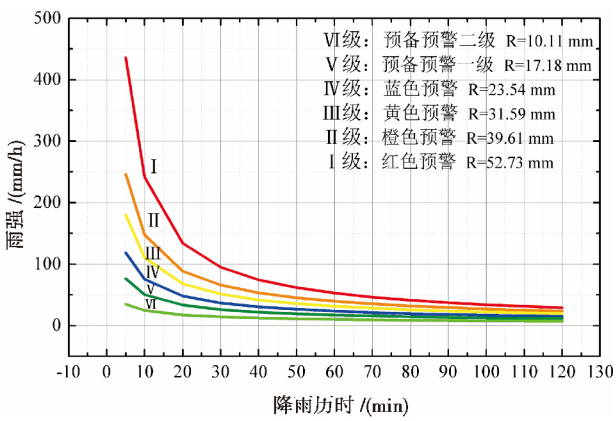
(b) 前期含水量干旱

图 4 三眼峪泥石流不同预警级别降雨历时与雨强对应关系

Fig. 4 Relationships between rainfall duration and rainfall intensity for debris flow at different early warning levels in Sanyanyu



(a) 前期含水量一般(中湿)



(b) 前期含水量干旱

图 5 罗家峪泥石流不同预警级别降雨历时与雨强对应关系

Fig. 5 Relationships between rainfall duration and rainfall intensity for debris flow at different early warning levels in Luojiayu

强很大、降雨历时较短的单峰型短历时强降雨的“点雨”；二是降雨雨强较小、持续时间很长的“绵绵细雨”此时雨强虽然很小，有时仅有4—5 mm/min，同样也会触发泥石流等地质灾害发生，应给与足够

的重视。  
2.4 历史三眼峪泥石流降雨预警级别、降雨特征重现  
三眼峪泥石流属于典型的降雨型泥石流，历史



上多发生泥石流。表 5 列举了近年来泥石流降雨以及预警级别特征。根据降雨特征,计算当时发生灾害时的降雨强度。对照表 3 结果,可以看出,历史几次大规模的泥石流地质灾害都在橙色预警Ⅲ级别以上,与历史记录相符。

表 5 历史三眼峪泥石流降雨特征以及预警级别  
Tab. 5 Historical rainfall characteristics and early warning levels for debris flow in Sanyanyu

泥石流发生时间	降雨量 /( mm)	降雨历时 /( min)	降雨雨强 /( mm/h)	预警 级别
1978.07.15	37.4	60	37.4	Ⅲ
1982.06.18	46.8	60	46.8	Ⅱ
1989.05.10	47	60	47	Ⅱ
1992.06.04	38.4	45	51.2	Ⅱ
1994.08.07	63.3	120	31.65	I
2010.08.08	77.3	40	115.95	I

将历史上 6 次泥石流地质灾害降雨特征投影到图 6,得到历史三眼峪泥石流地质灾害预警级别示意图。从图 6 中可以清晰看出,历史上各次泥石流灾害预警级别都很高,都在橙色预警Ⅲ级以上。舟曲“8.8”特大泥石流灾害,其发生的级别远远超出了历史上各次的泥石流灾害,也远远超出了红色预警Ⅰ级别。

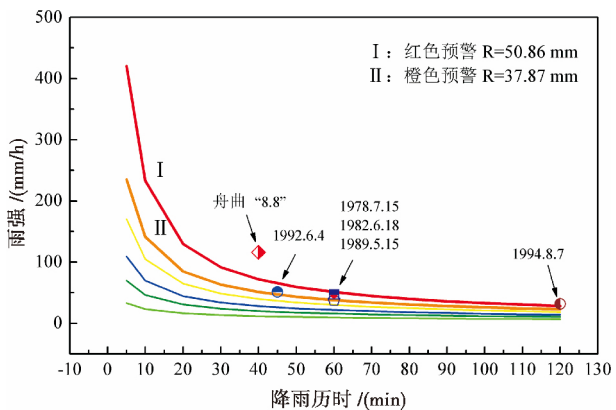


图 6 历史三眼峪泥石流预警级别验证

Fig. 6 Demonstration of early warning levels for historical debris flows in Sanyanyu

3 结论

(1) 本研究采用水文学方法计算了不同频率下洪水特征值以及不同规模的泥石流启动降雨量阈

值,建立了三眼峪、罗家峪小流域在前期含水量一般和干旱两种条件下不同预警级别的泥石流降雨雨强与历时阈值关系。

(2) 根据降雨特征、地质灾害启动机理、演化过程、危害程度及规模,以及降雨可能导致泥石流发生的概率和致灾范围和强度,将重现期 50 年、30 年、20 年、10 年的暴雨分别划分为红色预警(Ⅰ级)、橙色预警(Ⅱ级)、黄色预警(Ⅲ级)、蓝色预警(Ⅳ级)四个预警级别;同时将重现期为 5 年和 2 年的暴雨划分为Ⅴ级预备预警、Ⅵ级预备预警两个预备预警级别。

(3) 三眼峪小流域前期含水量在干旱条件下泥石流红色Ⅰ级至蓝色Ⅳ级的预警值分别为 56.10 mm/h、40.70 mm/h、31.74 mm/h、23.83 mm/h,预备Ⅴ级值Ⅵ级的预警值为 17.31 mm/h、10.16 mm/h;前期含水量一般条件下泥石流红色Ⅰ级至蓝色Ⅳ级的预警值分别为 50.86 mm/h、37.87 mm/h、29.88 mm/h、21.69 mm/h,预备Ⅴ级值Ⅵ级的预警值为 15.69 mm/h、9.48 mm/h。罗家峪小流域前期含水量在干旱条件下泥石流红色Ⅰ级至蓝色Ⅳ级的预警值分别为 52.73 mm/h、39.61 mm/h、31.59 mm/h、23.54 mm/h,预备Ⅴ级值Ⅵ级的预警值为 17.18 mm/h、10.11 mm/h;前期含水量一般条件下泥石流红色Ⅰ级至蓝色Ⅳ级的预警值分别为 49.39 mm/h、37.55 mm/h、29.49 mm/h、21.64 mm/h,预备Ⅴ级值Ⅵ级的预警值为 15.51 mm/h、9.10 mm/h。

(4) 不同预警级别的降雨雨强与降雨历时成  $I = \alpha \times D^\beta$  幂函数关系,  $\alpha$  和  $\beta$  数值在不同预警级别下成规律性变化,  $\alpha$  值随降雨级别的增加会逐渐增加,  $\beta$  值随降雨级别的增加而逐渐减少。

(5) 能够触发舟曲地质灾害发生的降雨特征可分为两种:一是降雨雨强大的单峰型短历时强降雨(“点雨”);二是降雨雨强小、持续时间较长的“绵雨”,都应给与足够的重视。

本研究采用水文学产汇流计算方法,计算在降雨资料欠缺的地区触发泥石流降雨临界阈值,实际检验具有一定的合理性。据文献<sup>[13]</sup>,该方法在其他无实测资料地区进行验算,也取得较好的结果,具有一定的推广价值。

参考文献(References)

[1] GUZZETTI 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: 239 – 267
- [2] ALEOTTI P. A warning system for rainfall – induced shallow failures [J]. *Engineering Geology*, 2004, 73: 247 – 265
- [3] WIECZOREK G F, GLADE T. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: *Debris flow hazards and related phenomena* ( Jakob M, Hungr O, eds) [J]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005, 325 – 362
- [4] GREEN W H, AMPT G. Studies of soil physics. Part I: The flow of air and water through soils [J]. *Journal of Agricultural Science* 1911, 4: 1 – 24
- [5] CROSTA G B, FRATTINI P. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In *Proceedings 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms* ( Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, eds). Siena, 2001: 463 – 487
- [6] CHEN H, LEE C F. Numerical simulation of debris flows [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37: 146 – 160
- [7] CHEN H, LEE C F. A dynamic model for rainfall – induced landslides on natural slopes [J]. *Geomorphology*, 2003, 51: 269 – 288
- [8] CHEN H, DADSON S, CHI Y G. Recent rainfall – induced landslides and debris flow in northern Taiwan [J]. *Geomorphology*, 2006, 77: 112 – 125
- [9] TANG C, RENGERS N, ASCH TWJV, et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province northwestern China [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2011, 11: 2903 – 2912
- [10] YU B, YANG Y H, SU Y C, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7 2010. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 437 – 444
- [11] WANG G L. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China. *Natural Hazards* [J]. 2013, 69(3): 1835 – 1847
- [12] XIAO H J, LUO Z D, NIU Q G, et al. The 2010 Zhouqu mudflow disaster: possible causes, human contributions, and lessons learned [J]. *Natural Hazards*, 2013, 67: 611 – 625
- [13] 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]
- [14] 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]
- [15] 铁道部第一设计院, 中国科学院地理研究所, 铁道部科学研究院西南所. 小流域暴雨洪峰流量计算(上) [J]. *铁道建筑*, 1976, 16(4): 7 – 12, 45 [The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railway of PRC, the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research of CAS, the Southwest Institute of Academy of Railway Sciences of the Ministry of Railway of PRC. The calculation method of Rainstorm Flood Peak Discharge in Small Basins [J]. *Railway Engineering*, 1976, 16(4): 7 – 12, 45]
- [16] 铁道部第一设计院, 中国科学院地理研究所, 铁道部科学研究院西南所. 小流域暴雨洪峰流量计算(下) [J]. *铁道建筑*, 1976, 16(5): 5 – 18 [The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railway of PRC, the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research of CAS, the Southwest Institute of Academy of Railway Sciences of the Ministry of Railway of PRC. The calculation method of Rainstorm Flood Peak Discharge in Small Basins [J]. *Railway Engineering*, 1976, 16(5): 5 – 18]

## Critical Rainfall Thresholds for Debris Flows in Zhouqu, China

XU Jiwei<sup>1,2,3</sup>, YU Guoqiang<sup>2,3</sup>, ZHANG Maosheng<sup>2,3</sup>, CONG Kai<sup>4</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geometry, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China;

4. Gansu Institute of Geo-Environment Monitoring Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A justified precipitation threshold would act as a solution to the engineered control of regional storm-type debris flow. In order to estimate the triggering precipitation for debris flows haunting Zhouqu region, Gansu province, China, two recent debris flow events occurred at Sanyanyu gully and Luojiayu gully, were exemplified for determination of the threshold value. Given antecedent soil moistures in either wet (regular) or dry circumstances, it studied correlation between rainfall intensity and duration in the process of motivating debris flow to various forewarning level. Hydrography method was borrowed to calculate the peak discharges at various frequencies and the associated precipitation threshold in initiating debris flow to varied extents. Results showed that as antecedent soil mois-



tures were in the regular and dry conditions ,early warning precipitation in the level of red I at Sanyanyu gully and Luojiayu gully arrived to 56.10 mm / h and 50.86 mm / h separately; in orange II pre-warning level it was 40.70 mm / h and 37.87 mm / h; in yellow III pre-warning level it was 31.74 mm / h and 29.88 mm / h; in blue IV pre-warning level it was 23.83 mm / h and 21.69 mm / h; in preparatory pre-warning level it was 7.31 mm / h and 15.69 mm / h; in preparatory VI pre-warning level was 10.16 mm / h and 9.48 mm / h. Relationship between rainfall intensity and duration at different levels of pre-warning could be interpreted as power function ,  $I = \alpha \times D^\beta$  , exhibiting regular changes in value in relation to levels of pre-warning. Rainfall leading to geohazard occurrences in Zhouqu region were characterized as two types: one took place with a short duration in the unimodal shape , concentrated precipitation , like as "Point Rain"; another type occurred with low intensity , a longer duration , like as "drizzle". This research will serve as a scientific initiative for regional monitoring and early warning of storm-type debris flows in Zhouqu region and it contributes to geologic hazard prevention and mitigation at local level.

**Key words:** Zhouqu; hydrology; debris flow; triggering rainfall; critical threshold