

文章编号: 1008 - 2786 - (2014)6 - 739 - 08

## 都汶公路沿线诱发泥石流的降雨特征

郭晓军<sup>1,2</sup>, 崔鹏<sup>1</sup>, 马力<sup>3</sup>, 孔应德<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川省气象局, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 都(江堰)汶(川)公路是通往川西北的重要交通要道,地震造成该路段泥石流危害极为严重。选择都汶公路南段为研究区,收集了 2008—2011 年间的 22 次泥石流事件及其对应的降雨过程,分析了雨型、降雨强度、前期降雨等因子对泥石流的影响,并利用  $I-D$  模型得出研究区泥石流的降雨阈值,分析时间和流域面积对阈值的影响。各种档次降雨雨型都可能诱发泥石流,降雨强度是泥石流的控制因子,降雨历时越长,需要的激发雨强越小;前期降雨对泥石流起着较为重要的作用,只有在超过 14.8 mm/h 时,较小的雨强才有可能诱发泥石流,且有效前期降雨越大,需要的激发雨强越小。地震造成泥石流的诱发临界降雨大幅减小,地震之后诱发泥石流的降雨条件逐年回升,2009 年之后泥石流的降雨阈值较 2008 年大幅上升;流域面积不同,泥石流的频率也有所差异。该研究可为该区泥石流的监测预警与预测预报作贡献。

**关键词:** 降雨雨型;降雨强度;前期降雨;泥石流;都汶公路

**中图分类号:** P642. 23

**文献标志码:** A

都(江堰)汶(川)公路地处中国西南主要地震带——龙门山断裂带,为 317 和 213 国道共用路段,是通往川西北的关键交通要道。“5·12”地震造成大量的松散碎屑物质堆积在公路沿线的沟道和坡面上,这些物源条件的改变,导致震后泥石流发生的临界雨量条件降低,泥石流活动频度和强度明显增加,且具有群发性的特点<sup>[1-4]</sup>。从 2008-09-03 震后重新通车以来,该路段暴发了大量的泥石流灾害。泥石流损毁公路、冲垮桥梁,形成堰塞湖,多次堵断河流,冲垮路基,阻碍了震后重建工作的进程,并多次摧毁了重建工作成果,严重危及灾区群众的生命财产安全。如 2010-08-13 红椿沟泥石流堵断岷江,形成堰塞湖,迫使岷江洪水冲向映秀镇,导致新建的城镇被淹,洪水泛滥造成 13 人死亡、59 人失踪,受灾群众 8 000 余人被迫避险转移<sup>[5]</sup>;2011-07-03 高家沟泥石流堆积扇挤压河道,导致岷江冲毁

对面路基,中断交通十余天<sup>[6]</sup>;2013-07-10 的强降雨,又再次诱发公路沿线群发性泥石流,导致都汶公路全线中断,给沿线居民生活造成了巨大困难。

从震后 5 a 的泥石流活动来看,都汶公路沿线泥石流仍处于高度活跃期,这种状况并将持续 10 ~ 20 a<sup>[4,7]</sup>。受强降雨影响,泥石流隐患还将长期存在。对泥石流进行预测预报或开展监测预警工作,将会降低泥石流灾害造成的损失。在泥石流预测预报方面,由于影响泥石流的降雨因子众多,如雨强方面有 10 min 雨强<sup>[8]</sup>,1 h 雨强,24 h 最大雨强,雨量方面有当日有效雨量和前期有效雨量等,因此如何选取降雨数据、选取多长时间段的降雨数据是建立临界雨量模型的关键,另外,降雨数据的处理,如利用衰减系数方法<sup>[7]</sup>概化前期降雨对土壤湿度的影响过程等,利用峰值雨强来代表泥石流激发雨强等,也是建立模型的重要步骤;由于降雨影响泥石流的

收稿日期(Received date): 2013-08-24; 改回日期(Accepted): 2014-01-19。

基金项目(Foundation item): 中科院重点部署项目(KZZD-EW-05-01-02)和国家科技支撑计划课题(2012BAK10B04)。[Supported by Key Deployment Project of Chinese Academy of Sciences(Grant No. KZZD-EW-05-01-02) and National Key Technologies R&D Program of China(Grant No. 2012BAK10B04).]

作者简介(Biography): 郭晓军(1985-),男,山西运城人,博士。研究方向为泥石流。[Guo Xiaojun(1985-), male, born in Shanxi Province, doctor and mainly engaged in debris flow.] E-mail: sblong2003@yahoo.com.cn

因子众多,现在普遍应用的模型或多或少有其局限性。在这其中,降雨雨强-历时( $I-D$ )模型<sup>[9-11]</sup>是目前国际上最为通用的临界雨量模型。

地震之后,都汶公路沿线针对监测预警方面的工作已大量开展,如洱沟、牛圈沟和红椿沟等流域均已布设雨量监测点,山区雨量站点覆盖面不足的问题已基本得到解决。然而到目前为止,尚未有预测预报方面的成果出现。本文收集了2008年地震之后到2011年的泥石流事件,结合其对应的降雨资料,分析诱发该地区泥石流的降雨过程和降雨特点,进而得出泥石流的降雨阈值,分析其阈值随时间和流域面积的变化和差异,旨在为泥石流的预测预报作贡献。

## 1 研究区概况

都汶公路南起都江堰,北至汶川县城。受东亚季风及地形影响,区内气候分异明显:南段映秀、漩口和紫坪铺河谷地带,属山地亚热带湿润季风气候区,为川西多雨中心,是暴雨常出现的地区之一,年降雨量达1 200 mm左右;北段绵虬、威州镇河谷地带属于暖温带大陆性半干旱季风气候区,气候干燥,降水量少而集中,年降水量约500 mm左右,且以暴雨为主。从震后泥石流的活动频率来看,都汶公路南段远高于北段,因此本文选择桃关村以南路段作为研究区。

该区地处岷江上游河谷,是青藏高原东部边缘与四川盆地的过渡区,为典型的高山峡谷区,河流深切,沟谷深邃,地表起伏巨大,相对高度达3 000 m以上。区内新构造运动活跃,活动断裂构造复杂,龙门山中央断裂——映秀—北川断裂穿越该区,前山断裂和后山断裂活动对该区有较大影响(图1)。沿线地层发育较完整,其中奥陶系、志留系地层大部缺失,小范围有出露。岩性主要是花岗岩类和砂岩,间有煤层、灰岩等。

研究区地处“5·12”汶川地震极震区,地震造成崩塌、滑坡、滚石及不稳定边坡广布,沟谷和山坡上形成大量的固体松散物质,为泥石流的发育提供了丰富的物质基础,因此,沿线泥石流沟密布,研究区共有流域型泥石流17条,坡面泥石流15处(图1)。其中典型泥石流沟的流域参数和地震造成的崩滑体面积等见表1<sup>[2]</sup>。

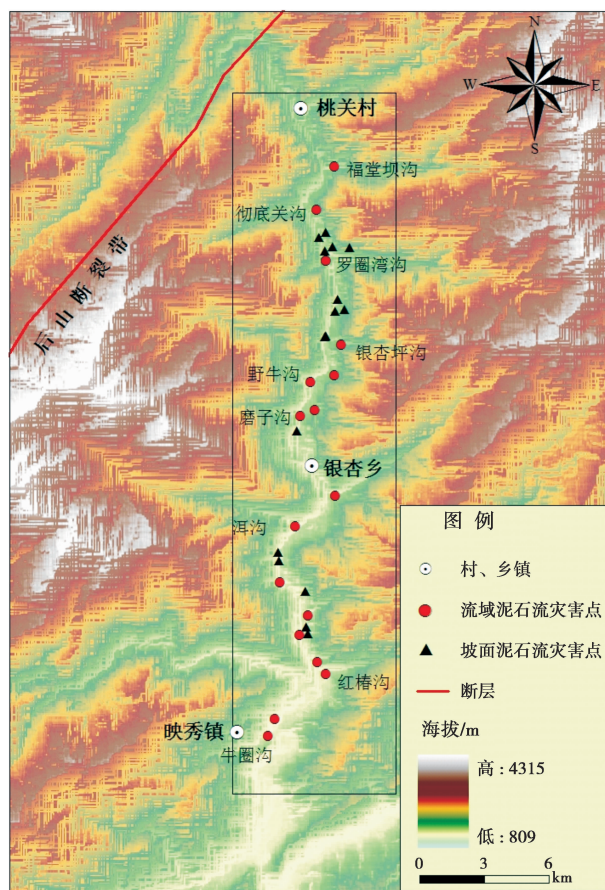


图1 都汶公路南段泥石流灾害点分布

Fig. 1 Debris flow distributions in study area

## 2 数据获取与分析

本文通过野外考察、调查和文献查询等方式<sup>[4-6,12-13]</sup>,收集了2008—2011年间的22次典型泥石流事件。野外调查主要访问当地群众关于泥石流的暴发次数、具体暴发时间、持续时间、大致规模及其危害等内容。受地震的影响,2008年都汶公路沿线雨量监测设施完全摧毁,因此借用距离该区最近的都江堰站的降雨资料,2009—2011年间的降雨资料采用映秀镇和银杏乡的雨量资料(图1)。

本文借鉴文献<sup>[14]</sup>的降雨场次划分方法,以前后12 h无降雨作为一场降雨。参考文献<sup>[15]</sup>关于降雨组成的划分,见图2。其中,激发雨强是指激发泥石流起动的1 h雨强;诱发雨量即直接前期雨量,是指当场降雨中激发泥石流的小时雨强前的总降雨;前期降雨是指发生本次泥石流的降雨开始前n天的累积降雨量,用公式(1)计算;有效降雨量是指前期降雨与诱发雨量之和,即对本次泥石流的形成有贡

献的总降雨量;无效雨量是指泥石流起动之后的降雨量,虽然这部分降雨可以增大泥石流的规模和历时,但其对泥石流的发生没有作用

$$R_a = \sum_{i=1}^n R_i (K)^i \tag{1}$$

式中  $R_a$  代表前  $n$  天前期降雨总量,mm; $R_i$  代表第  $i$  天的降雨量,mm; $K$  代表衰减系数,取 0.8<sup>[15]</sup>。

表 1 研究区典型泥石流流域参数和崩滑体面积

Table 1 Basin characteristics parameters and source materials for debris flows

流域/沟道名称	流域面积/km <sup>2</sup>	崩塌、滑坡体面积/km <sup>2</sup>	沟床比降/%
洱沟	39.4	9.34	272.3
福堂坝沟	32.62	4.55	253.3
罗圈湾沟	28.65	4.18	250.4
太平沟	27.31	5.11	249.8
野牛沟	24.26	8.76	303.7
彻底关沟	16.97	3.82	312.3
牛圈沟	12.7	2.03	269.4
磨子沟	7.46	3.59	504.2
银杏坪沟	7	1.64	449.8
马鞍子沟	6.65	0.89	371.2
红椿沟	6.16	1.23	377.7
一碗水沟	3.52	0.19	501.8

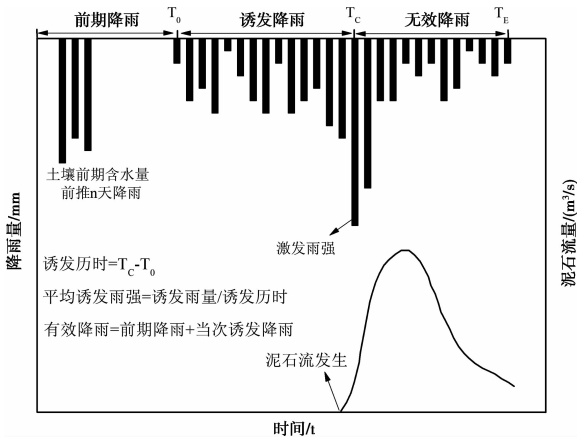


图 2 形成泥石流的降雨组成

Fig. 2 The relationship between rainfall and debris flow occurrence

受目前泥石流监测预警手段和野外调查的局限,只有 7 次泥石流事件收集到具体的泥石流暴发时间。在这 7 次事件中,除了 2010-08-13 红椿沟泥石流之外(图 3),其余泥石流都是在降雨过程的峰值雨强时刻或某一雨强激增时刻暴发(图 4),因此,我们假设另外没有具体暴发时间的 15 次泥石流

都发生在降雨过程的峰值雨强时刻,概化泥石流的诱发降雨过程。由此,提取了都汶公路沿线泥石流诱发降雨的持续时间、诱发雨量、激发雨强、前期降雨等信息。

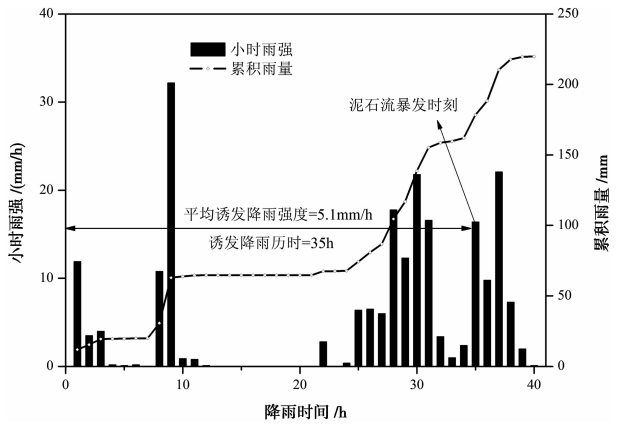


图 3 2010-08-13 红椿沟泥石流暴发时刻与降雨过程

Fig. 3 Debris flow occurrence time and rainfall process on 13<sup>th</sup> August, 2010 in Hongchun Gully

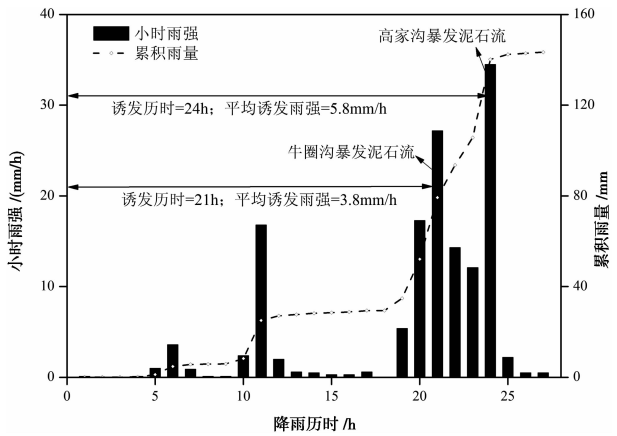


图 4 2011-07-03 牛圈沟和高家沟泥石流暴发时刻与降雨过程

Fig. 4 Debris flow occurrence time and rainfall process on 3<sup>rd</sup> July, 2011 in Niujan Gully and Gaojia Gully

3 诱发泥石流的降雨特征

3.1 不同雨型下的激发雨强特征

从 22 次诱发泥石流的降雨过程来看,震后泥石流的最小激发雨强为 3.7 mm/h,最小诱发雨量为 5.3 mm,都发生在 2008-05-17,最大激发雨强为 34.5 mm/h,最大诱发雨量 140.8 mm,都发生在 2011-07-03;平均激发雨强为 14.8 mm/h,平均诱发雨量为 43.5 mm/h。

如前文所述,绝大部分泥石流都暴发在一次降雨过程的峰值雨强时刻或雨强激增时刻,由此可见激发雨强在该地区的泥石流暴发中起着比较关键的作用。图5为泥石流的激发雨强与诱发历时的关系。由于实际降雨过程中,激发雨强(峰值雨强)往往不能真实代表激发泥石流所需要的雨强,而一般是高于该值,因此在图5中,我们只关注雨强的下限。由图5可以看出,诱发历时在6 h以内、6~12 h之间和超过12 h的降雨场次分别为5次、5次、12次,分别占22.7%、22.7%和54.6%,但无论雨型如何,雨强超过一定值,就有可能激发泥石流。短历时降雨中(历时<6 h),除了2008-05-17暴发的泥石流之外,最小雨强为7.2 mm/h;长历时降雨中(历时>12 h),超过4.1 mm/h便可激发泥石流,说明降雨历时越长,激发泥石流需要的雨强越小。

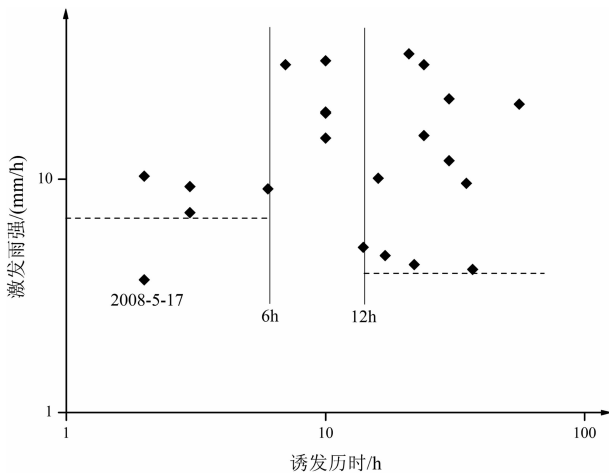


图5 诱发泥石流的降雨激发雨强与诱发历时的关系

Fig. 5 Relationship between triggering rainfall intensity and duration

### 3.2 不同有效降雨下激发雨强特征

降雨历时间接影响诱发泥石流的降雨量,即影响有效降雨。由图6为激发雨强与有效降雨的关系。如上所述,我们只关注雨强的下限。由图6可以看出,除了2008-05-17、2008-09-22和2009-07-08之外,大部分泥石流暴发的有效降雨都在14.8 mm以上,且超过14.8 mm之后,较小的雨强即可激发泥石流。有效前期降雨越小,需要的激发雨强越强,如2008-09-22的有效前期雨量仅为2.3 mm,激发雨强为31 mm/h;2009-07-08前期降雨为4.8 mm,激发雨强为9.3 mm/h,而当有效前期雨量超过14.8 mm/h,4~5 mm/h雨强即可激发泥石流。

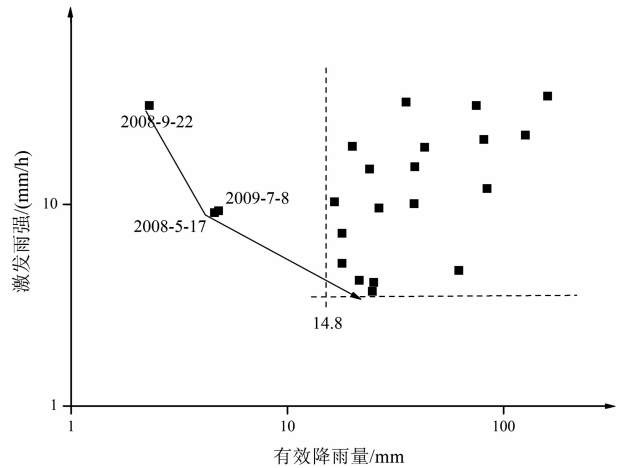


图6 诱发泥石流的降雨激发雨强与有效雨量的关系

Fig. 6 Relationship between triggering rainfall intensity and effective antecedent rainfall

### 3.3 震后诱发雨强与诱发雨量的变化

根据谭万沛<sup>[10]</sup>的研究,汶川地震以前,龙门山地区诱发泥石流的日降雨量为80~100 mm。根据震后都江堰站的降雨资料,2008-07-01到2008-09-30,48 d有降雨记录,有7 d雨量超过25 mm,其中次降雨量超过25 mm的有6 d,均有泥石流发生;根据映秀站和银杏站的降雨资料,2009—2011年间,次降雨量超过21.4 mm的有20次,其中16次发生泥石流。另外,震后诱发雨量低于24.0 mm的泥石流场次为11次,占总泥石流次数的50%。说明震后造成流域内积累的巨量物源以及严重的沟道堵塞条件使得研究区的泥石流活动极其活跃,降雨的临界条件极大降低,次雨量临界值为21~25 mm,而诱发雨量则更低。

2008年之后,随着坡面上表层松散土体的逐渐固结和沟道内松散物质的逐渐粗化,坡面和沟道内土体的表层抗冲刷能力逐渐增强,其诱发泥石流的临界雨量虽仍远低于震前水平,但有所回升。如图7所示,泥石流最小激发雨强和最小诱发雨量均有所升高。到2011年,都汶公路泥石流的最小激发雨强为19.2 mm/h,最小诱发雨量为55 mm/h。

## 4 震后诱发泥石流的降雨 I-D 关系

### 4.1 震区的 I-D 关系

降雨历时-雨强(I-D)预报模型是目前国际上最为通用的临界雨量模型<sup>[12-14]</sup>。将当次降雨的诱发历时和平均诱发雨强画在双对数坐标中,得出

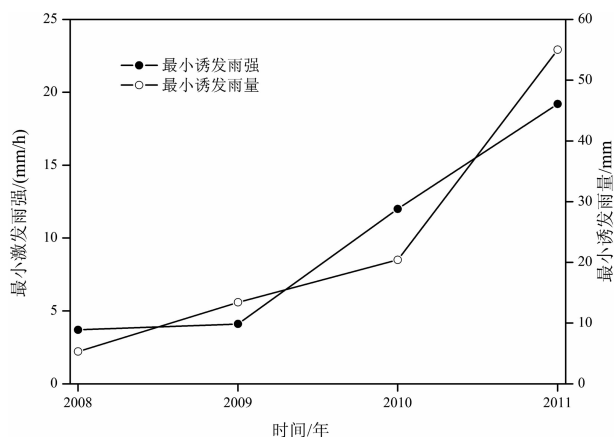


图7 2008—2011年间最小诱发降雨量和最小激发雨强的变化

Fig. 7 Variation of lowest triggering rainfall intensity and inducing rainfall quantity

最低水平线以及不同百分比水平线  $I = \alpha D^{-\beta}$ , 作为诱发泥石流的降雨阈值。

本文根据提取出来的诱发降雨的历时和降雨强度, 得出其  $I-D$  关系, 见图8中实线。考虑到2008年地震造成大范围崩塌、滑坡和植被破坏, 因此在刚发生短时间内, 部分泥石流的形成与松散土体的抗冲性有关, 雨强一旦超过地表入渗率, 形成地表径流, 便可带走坡面或沟道的松散物质, 较小的降雨便有可能激发泥石流, 因此, 本文画出2009—2011年间暴发泥石流的降雨  $I-D$  关系, 见图8中虚线。关系式分别为

$$I = 4.4026D^{-0.7045} \quad (2 \text{ h} < D < 56 \text{ h}) \quad (2)$$

$$I = 22.707D^{-1.2244} \quad (2 \text{ h} < D < 56 \text{ h}) \quad (3)$$

与公式(2)相比, 公式(3)中系数大幅提高, 说明短历时降雨中, 诱发泥石流需要的平均雨强大幅上升; 这与野外考察实际情况也极为吻合。地震之后, 都汶公路沿线泥石流多为沟道起动泥石流, 地震发生1 a之后, 一方面, 随着植被的逐渐恢复, 土壤入渗率逐渐升高, 相同降雨条件下, 地表产流量减小, 因此地表产流需要的降雨强度提高; 同时, 随着坡面表层松散物质的被带走, 沟道物质的逐渐粗化, 松散物质起动需要的临界径流条件也有所提高。与公式(2)相比, 公式(3)指数大幅下降, 说明随着降雨历时的增加, 诱发泥石流需要的平均雨强迅速减小。随着降雨时间的增加和水分入渗过程的持续, 松散土体极易自身液化, 因此, 降雨时间稍长, 小雨强降也可以诱发泥石流。

2009年之后诱发泥石流的降雨  $I-D$  关系也接近震后泥石流的90%线, 因此, 我们将公式(2)作为

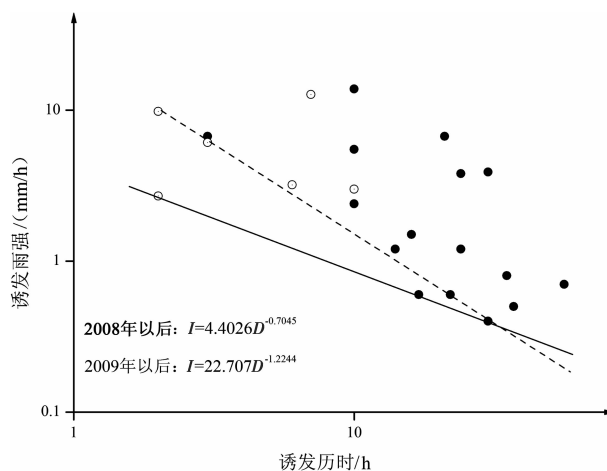
图8 2008—2011年间诱发泥石流的降雨  $I-D$  关系

Fig. 8  $I-D$  threshold of rainfall triggering debris flows between 2008 and 2011

震后都汶公路的泥石流降雨临界条件, 并与相关地区的  $I-D$  阈值<sup>[13-17]</sup> 相比较, 见图9。短历时降雨中, 研究区的诱发泥石流需要的平均雨强高于Caine<sup>[12]</sup> 和 Guzzetti 等<sup>[14]</sup> 的世界滑坡泥石流临界线, 但随着降雨时间的持续, 在长历时降雨中, 本区诱发泥石流需要的平均雨强迅速减小。与唐川等人<sup>[17]</sup> 在清平的研究结果 ( $3 \text{ h} < D < 12 \text{ h}$ ) 相比, 都汶公路的临界  $I-D$  关系更低, 需要的诱发雨强更小, 且诱发泥石流的降雨历时更长, 这主要与两个研究区的气候条件和受地震的影响程度有关系, 如清平地区的年降雨量为1586 mm, 而都汶公路的年降雨量为1200 mm (由四川省年降雨量插值得出), 意味着清平地区的降雨更为充沛, 次降雨量和峰值雨强更大, 因而激发泥石流的雨强更大, 历时更短, 多为短历时暴雨激发泥石流; 而都汶公路距离接近震中, 不但短历时暴雨易激发泥石流, 且在中、长历时降雨中, 很小的雨强便可激发泥石流。

#### 4.2 不同流域面积的降雨 $I-D$ 关系

根据野外调查, 虽然都汶公路沿线各沟都是传统意义上的高频泥石流沟, 但根据流域面积的不同, 各沟暴发泥石流的频率有所差异, 如关山沟和某些坡面泥石流 (见图1), 几乎是每逢暴雨就发生泥石流, 而洱沟、野牛沟、福堂坝沟等面积较大的流域, 只有在暴雨情况下才发生泥石流。本文收集沿线面积大于  $20 \text{ km}^2$  的流域 (见表1) 的泥石流事件, 并得出其  $I-D$  关系, 见图10中虚线。

关系式为

$$I = 14.705D^{-0.7855} \quad (2 \text{ h} < D < 56 \text{ h}) \quad (4)$$

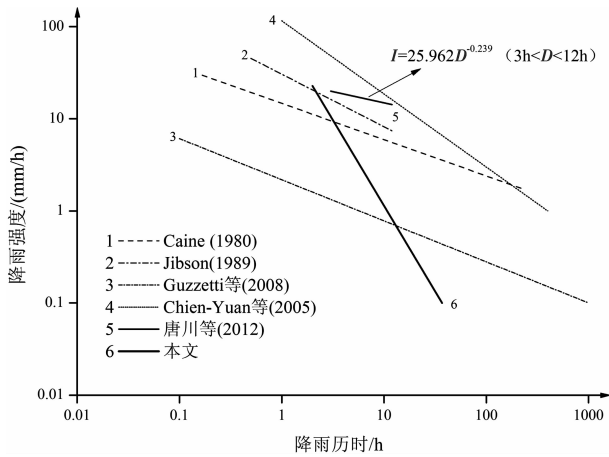


图9 都汶公路诱发泥石流的降雨  $I-D$  关系  
与世界其他地区的比较

Fig. 9 Comparison with  $I-D$  thresholds in other regions

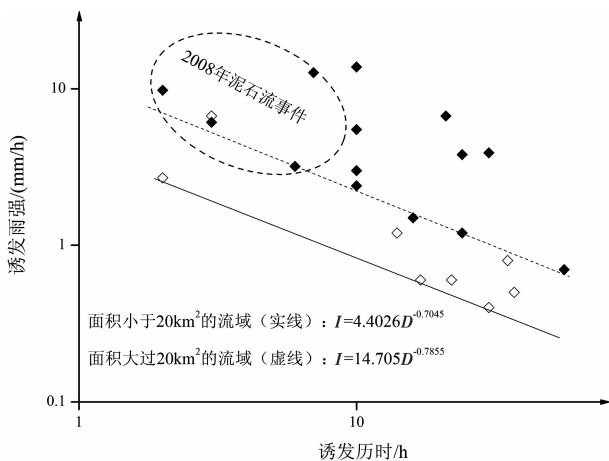


图10 面积较大的流域诱发泥石流的  $I-D$  关系  
Fig. 10  $I-D$  thresholds of rainfall triggering debris flows  
in big watershed

这种频率上的差异主要是由于流域发育程度的不同引起的,流域面积不同,泥石流形成的模式不同。面积较大的流域发育程度较为完善,流域内部也是由若干条面积较小的支沟组成,由于支沟内松散物质极为丰富,且支沟沟床比降一般都在300‰以上,因此,短历时降雨中,较小的雨强便可激发支沟泥石流,但主沟流域面积较大,与支沟相比,主沟内泥石流形成过程受各条支沟泥石流汇流或支沟泥石流与主沟洪水汇流过程的制约,因此只有洪水流量较大,且若干条支沟同时暴发泥石流时,主沟才表现出较为明显的泥石流。另外,图10中,10 h以内的降雨诱发的4次泥石流都发生2008年,说明2009年之后,随着固体物质的逐渐稳固,面积较大的流域需要更长时间和更丰富的前期降雨量,进而在激发雨强

的作用下才能形成泥石流。

## 5 结论与讨论

本文通过对都汶公路沿线诱发泥石流的降雨资料的处理与分析,从降雨雨型、前期降雨和当次降雨等方面分析了沿线泥石流的降雨特征,分析了震后诱发泥石流的降雨阈值随时间的变化和受流域面积的影响,得出以下结论:

1. 短历时、中历时和长历时降雨诱发的泥石流分别占22.7%,22.7%和54.6%。说明各种雨型都可能诱发泥石流,降雨历时越长,激发泥石流需要的雨强越小,诱发降雨的历时超过12 h,雨强>4.1 mm/h便可激发泥石流。有效前期降雨越大,需要的激发雨强越小,且只有在超过14.8 mm/h时,较小的雨强才有可能诱发泥石流。

2. 随着松散物质的逐渐稳固,地震之后4 a内诱发泥石流需要的年度最小激发雨强和诱发雨量逐渐升高,都汶公路沿线泥石流的降雨  $I-D$  阈值为:  $I = 4.4026D^{-0.7045}$ ,2009年之后暴发的泥石流的降雨  $I-D$  阈值为  $I = 22.707D^{-1.2244}$ 。该地区的  $I-D$  关系表现为随着降雨时间的持续,诱发泥石流需要的平均雨强迅速减小。

3. 流域面积不同,泥石流的频率有所差异,面积超过20 km<sup>2</sup>的流域的降雨  $I-D$  阈值为  $I = 14.705D^{-0.7855}$ 。

$I-D$  关系的局限性在于模型本身是关于当次诱发降雨的历时与平均雨强二者之间的关系,忽略了激发雨强(峰值雨强)与前期降雨的影响。因此,本文同时也分析了激发雨强与前期有效降雨对泥石流的影响。如何同时考虑这些因素,进而形成一个综合多指标模型是降雨型泥石流预报模型的关键,是本文下一步工作的内容。另外,需要指出的是,受到目前监测手段的局限,对于暴发于山区流域的泥石流临界雨量研究,只能依赖于其附近气象站的降雨资料,而这些雨量站一般与泥石流流域有一定的距离,其资料的代表性是泥石流研究学者关注的重点,因此本文将研究区局限于与雨量站距离较近的路段,而不是都汶公路全线;同时,对于泥石流事件,目前一般采用事后调查来获取其发生信息,需要指出的是,本文收集了22次泥石流事件,但震后灾区暴发泥石流次数高于此数。另外,获取的发生时间主要通过野外访问的方式获得,其准确性与资料的



全面性也值得进一步提高。因此,加强流域的雨量和泥石流监测,并与现有的雨量资料相对比是下一步工作的内容,也是泥石流监测预警与预测预报的重点。

**致谢:**本文作者感谢四川省气象局提供的降雨数据。

## 参考文献 (References)

- [1] Cui Peng, Wei Fangqiang, He Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation[J]. Mountain Research, 2008, 26(3): 280 – 282 [崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280 – 282]
- [2] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. Hazard assessment of debris flow valleys along Dujiangyan – Wenchuan Highway after 5·12 Wenchuan devastating Earthquake [J]. Journal of Sichuan University :Engineering Science Edition, 2009, 42(3): 131 – 139 [庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 5·12 地震后都汶公路沿线泥石流沟危险性评价[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2009, 42(3): 131 – 139]
- [3] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. Risk assessment of collapses and landslides caused by 5.12 Wenchuan Earthquake—a case study of Dujiangyan – Wenchuan Highway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010, 29(Suppl. 2): 3736 – 3742 [庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 5·12 汶川地震崩塌滑坡危险性评价——以都汶公路沿线为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3736 – 3742]
- [4] Xie Hong, Zhong Dunlun, Jiao Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan Earthquake hit area in 2008[J]. Mountain Research, 2009, 27(4): 501 – 509 [谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501 – 509]
- [5] Tang Chuan, Li Weile, Ding Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan Earthquake [J]. Earth Science – Journal of Chinese University of Geosciences, 2011, 36(1): 172 – 180 [唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8.14”特大石流灾害调查[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(1): 172 – 180]
- [6] Guo Xiaojun, Xiang Lingzhi, Zhou Xiaojun, et al. Causes and disaster forming characteristics of debris flows along the Dujiangyan – Wenchuan Highway in 2011[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(3): 81 – 85 [郭晓军, 向灵芝, 周小军, 等. 高家沟泥石流和深溪沟泥石流灾害特征[J]. 灾害学, 2012, 27(3): 81 – 85]
- [7] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan Earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011, 56(1): 19 – 36
- [8] Su Pengcheng, Wei Fangqiang, Cheng Zunlan. Debris flow activity of Mozi Gully after Wenchuan Earthquake on May 12 [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 16 – 22 [苏鹏程, 韦方强, 程尊兰, 等. 5·12 汶川地震对磨子沟的影响及震后泥石流活动状况[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 16 – 22]
- [9] Cui Peng, Zhu Yingyan, Chen Jie, et al. Relationships between antecedent rainfall and debris flows in Jiangjia Ravine, China [G]// Chen CLand Major JJ (eds.). Debris-flow hazard mitigation – Mechanics, Prediction, and Assessment. Millpress, Rotterdam, 2007: 1 – 10
- [10] Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan, et al. Regional prediction on rainfall debris flow and landslide [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology, 1994. [谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与 [M]. 成都: 四川科技出版社, 1994.]
- [11] Tan Wanpei. Basic theory and study situation of rainstorm debris flow forecast in China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 88 – 95 [谭万沛. 中国暴雨泥石流预报研究基本理论与现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 88 – 95]
- [12] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography, 1980, 62: 23 – 27
- [13] 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
- [14] 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: 3 – 17
- [15] Jibson R. Debris flow in southern Puerto Rico [J]. Geological Society of America, Special Paper, 1989, 236: 29 – 55
- [16] Chien – Yuan C, Tien – Chien C, Fan – Chieh Y, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring [J]. Environmental Geology, 2005, 47: 715 – 724
- [17] Tang Chang, van Asch TWJ, Chang Ming, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China; The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms [J]. Geomorphology, 2012, 139 – 140: 559 – 576

# Triggering Rainfall Characteristics for Debris Flows along Dujiangyan – Wenchuan Highway of Sichuan

GUO Xiaojun<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>1</sup>, MA Li<sup>3</sup>, KONG Yingde<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Earth Surface Progress/Insti. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Meteorological Administration, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Dujiangyan – Wenchuan Highway is the key traffic trunk to Northwest Sichuan of China which was heavily influenced by debris flows induced by the “5 · 12” Wenchuan Earthquake. 22 debris flow events during 2008 and 2011 and their responsible rainfall processes were collected, and triggering rainfall intensity, rainfall duration, and effective antecedent rainfall was analyzed.  $I - D$  threshold was used to represent the critical rainfall conditions for debris flows. Event rainfall intensity is the key factor that triggering debris flows. Debris flow happens potentially over the condition that rainfall intensity is over 3.7 mm/h in long-duration rainfall types and the critical intensity decreases as duration increases. Effective antecedent rainfall also affects the debris flow occurrences that debris flows were only possibly triggered by small rainfall intensity when the effective antecedent rainfall is over 14.8 mm/h. The lowest rainfall intensity and rainfall amount rise up annually from 2008 to 2011.  $I - D$  threshold is quite low in this region for debris flows after the earthquake, while that threshold is much higher from between 2009 and 2010, represents the effect of solid materials stability. The frequency varies according to the area of basins. The study can contribute to the debris flow warning in the study area.

**Key words:** Rainfall type; rainfall intensity; antecedent rainfall; debris flow; Dujiangyan – Wenchuan Highway

附录 22 次泥石流事件序列表

Appendix Table 22 debris flows sequence of events

序号 No.	日期 Date	雨量站 Rainfall stations	当次雨量 When Rainfall /mm	降雨历时 Rainfall duration /h	最大降雨强度 Maximum rainfall intensity / (mm/h)	诱发历时 Induce lasted /h	平均诱发雨强 Average rainfall intensity induced / (mm/h)	前期有效降雨 Early effective rainfall/mm
1	2008-05-13	都江堰	47.3	29	9.1	6	3.2	4.6
2	2008-05-17	都江堰	5.3	2	3.7	2	2.7	24.7
3	2008-08-06	都江堰	40	31	15.0	10	3.0	24.0
4	2008-08-11	都江堰	24.7	27	7.2	3	6.1	17.9
5	2008-09-22	都江堰	94.7	16	31	7	12.7	2.3
6	2008-09-24	都江堰	37.2	39	10.3	2	9.8	16.5
7	2009-07-08	映秀	29.7	18	9.3	3	4.5	4.8
8	2009-07-16	映秀	21.4	59	4.2	22	0.6	21.5
9	2009-07-17	映秀	21.4	59	4.1	37	0.5	25.1
10	2009-07-22	映秀	36.5	40	9.6	35	0.8	26.5
11	2009-07-25	映秀	27.9	22	10.1	16	1.5	38.5
12	2009-08-22	映秀	25.5	33	5.1	14	1.2	17.9
13	2009-08-26	映秀	39.6	14	19.4	10	2.4	20.0
14	2009-09-14	映秀	46.6	40	15.4	24	1.2	38.8
15	2010-08-13	映秀	220	40	32.2	10	13.8	35.4
16	2010-08-14	映秀	220	40	22.1	30	3.9	126.1
17	2010-08-18	映秀	63.6	69	12.0	30	0.4	83.7
18	2010-08-19	映秀	63.6	59	21.0	56	0.7	81.0
19	2010-08-21	映秀	23.2	69	4.7	17	0.6	62.0
20	2011-07-01	映秀	75.6	19	19.2	10	5.5	43.1
21	2011-07-03	映秀	144.6	23	34.5	21	6.7	159.8
22	2011-08-20	映秀	91.4	24	31.0	24	3.8	74.7