

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.08

我国高频率泥石流的雨量特征

马超¹, 何晓燕², 胡凯衡³

(1. 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境

研究所山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 本文以我国高频率泥石流沟为研究对象, 首先与中、低频泥石流进行形成条件对比, 再对三大阶梯的高频泥石流以及汶川灾区部分高频泥石流激发雨量进行了分析。结果表明: 高频泥石流沟与物源量和软弱岩土体密切相关; 植被覆盖度只是高频泥石流的必要条件。三大地形阶梯中, 泥石流暴发时雨量随整体地势降低逐渐增加, 高频泥石流受“气温 + 前期雨强”逐渐过渡到“前期降雨 + 实时降雨”以及高阈值条件。绝大部分高频率泥石流沟的 10 min 雨量都低于 7 mm/10 min, 汶川灾区的高频率泥石流雨量阈值与小江、白龙江典型高频率泥石流沟 10 min 雨量阈值相差不大, 但前期降雨历时长, 雨量也高。通过我国高、中、低不同频率泥石流的“前期雨量 + 10 min 雨量”散点图得出我国高频率泥石流发生雨量区间。

关键词: 高频率泥石流; 小江; 汶川灾区; 雨量; 预警方法

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0043-08

Rainfall parameter characteristics of high-frequency debris flow in China

MA Chao¹, HE Xiaoyan², HU Kaiheng³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China

Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Institute of Mountain

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences; Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: This paper firstly analyzed the formation conditions of debris flows referring to high, medium and low frequency, then the rainfall thresholds were also compared among the debris flows in eastern, southwestern, Tibet Plateau in China, as well as the Wenchuan earthquake region. The analysis revealed that active debris flows were related closely to amount and weak properties of loose materials other than necessary vegetation cover. Totally, the real-time rainfall exhibits an increasing tendency as the height decrease from eastern Tibet plateau, to eastern parts of China. These active debris flows were triggered by “warm climate + antecedent rainfall” in Tibet plateau, “antecedent precipitation + rainfall intensity” and high rainfall separately. Most of the active debris flows were triggered by 10 minutes rainfall less than 7 mm. The 10 minutes rainfall of active debris flows in Wenchuan earthquake region is similar with that in Xiaojiang and Bailongjiang River, while the antecedent rainfall appears to be longer and higher. Finally, we developed the rainfall threshold interval by comparing the relationship of “antecedent rainfall + rainfall intensity” of debris flows with varying frequency.

Keywords: active debris flow; Xiaojiang river; Wenchuan region; rainfall threshold; forecasting method

收稿日期: 2014-11-19; 修订日期: 2014-11-29

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAK10B04); 北京林业大学新教师科研启动项目(20141054)

第一作者: 马超(1986-), 男, 博士, 主要从事山地灾害预警预报研究。E-mail: sanguoxumei@163.com

0 引言

泥石流临界雨量反映了泥石流流体抵御外界水源条件触发、起动的综合能力。若泥石流激发阈值低,区域暴雨频率高,雨量达到或超过泥石流临界雨量机率越大,泥石流暴发频率高。同一泥石流沟中,物源体势能和储量在短时间内相对稳定,泥石流暴发随降雨周期性、季节性、等突发性因素而变化,因而形成不同频率、性质的泥石流。

我国高频率泥石流众多,这些高频率泥石流是区域特殊地质构造和气象、水文条件综合作用的结果。高频率泥石流具有与中、低频率泥石流不具备的形成条件,如物源空间分布、储备,稳定程度等,激发雨量阈值也低。我国一般用 10 min、1 h、24 h 雨量,前期雨量以及相应指标组合来建立预警预报模式,针对不同频率的泥石流沟,选择不同预警模式、指标。本文以我国高频率泥石流为对象,搜集基本物源、岩性、植被和触发雨量历史资料,对比分析对其形成条件和触发雨量,进一步认识我国高频率泥石流的触发雨量。

1 不同频率泥石流沟的形成条件对比

我国泥石流集中、成带分布于三大地形阶梯的两

大地形过渡带上。高频率泥石流主要分布在气候干湿分明、较暖湿、局部暴雨强度大、冰雪融化快的地区(表 1)。如小江流域、白龙江流域是我国著名的暴雨泥石流多发区。区域内蒋家沟、大白泥沟、小白泥沟,火烧沟、柳弯沟等每年暴发泥石流几次至几十次^[1-2]。西藏高寒山区是我国冰川泥石流多发区,区域内地壳运动剧烈,地块强烈升降,地震频繁发生,各种泥石流灾害发育^[3];成昆铁路穿越川滇山地和高原崇山峻岭间,泥石流历来活跃^[4];汶川强震后沿龙门山主断裂带山区受到高频泥石流袭击,震后泥石流表现出“高频率、高量级、阈值低、群发性”等特征^[5-9];北京山区以及黄土高原是我国暴雨泥石流、泥流的主要分布区之一,受区域年降水影响,泥石流暴发间歇期较长,活动频率偏低^[10-11]。选取以上地区典型泥石流沟进行物源、岩性和植被条件对比。其中,所选取的泥石流沟不含矿渣型以及物源受人类活动影响明显的泥石流沟。受区域地质地貌以及自然地理环境影响,部分泥石流沟属于中、低等频率(表 2,表 3)。

1.1 物源条件

高频率泥石流沟内物源丰富。以崩塌、滑坡形式存在的物源体不稳定,多处于极限平衡状态,坡面、支沟内也积累了大量的松散物源体。这些不稳定物源不间断的

表 1 我国三大地形阶梯泥石流活动环境条件

Table 1 Surrounding conditions of debris flows in three typical terrains of China					
地形阶梯	第一阶梯		第二阶梯		第三阶梯
大区域	西部冰川泥石流		中部山地暴雨泥石流	黄土高原泥流	东部山区水石流
部分区域	青藏高原、天山、祁连山、喀拉昆仑山地		川滇、横断、陇南、秦巴、川东鄂西山地	晋西、陕北、陇东、陇西山地	长白山、小兴安岭、燕山、太行山、大别山、井冈山、南菱山、台湾、海南岛山地
典型区域	川藏线、中巴公路沿线		小江、白龙江、成昆线、大盈江、龙门山、宝天线	天兰线、兰青线、兰州市	北京山区、辽宁老帽山
地质构造	冰川、断裂褶皱带		深大断裂带、断裂带、逆冲推覆构造、旋转构造	黄土区	构造隆起带、燕山褶皱带
气候条件	高原山地气候		温带大陆性气候		亚热带、温带季风气候
	降雨总体东多西少;川藏线东部为太平洋、印度洋海洋性气候,西部为西北环流大陆性气候		季风气候,亚热带湿润气候、半干旱气候;干湿分明,多暴雨中心		内陆、干旱半干旱气候、降水周期变化短
	北京:暖温带半干旱、半湿润季风气候区;湖南、台湾:热带、亚热带季风湿润气候				
降雨	降水变化随高差变化大,最低达300 mm,最高达4000 mm		白龙江:400~1100 mm 成昆线:800~1300 mm 龙门山区:600~1400 mm 小江:800~1200 mm		土石山区最大达800 mm
					600~1000 mm 北京山区:400~800 mm

注:因我国泥石流分布面积广,表中仅摘录了有数据记录的资料。

表 2 泥石流按发生频率分类

Table 2 Classifications of debris flows according to occurrence of frequency				
类型	高频泥石流	中频泥石流	低频泥石流	极低频泥石流
暴发频次	一年多次至 5 年一次	1 次/(5 ~ 20 年)	1 次/(20 ~ 50 年)	1 次/>50 年

下滑、坠落,沟道泥石流强烈铲刮、淤埋导致物源区多形成裸地景观。尤其是我国几条典型的高频率泥石流沟,如蒋家沟、浑水沟、火烧沟等。蒋家沟、浑水沟、古乡沟、加马其美沟等泥石流暴发频率与源区崩塌、滑坡活动次数和沟道累积物源量紧密相关^[12-14]。中、低频率泥石流物源并不丰富,部分泥石流沟物质源于不合理经济活动,如开矿、筑路所导致的废弃渣;大部分的中、低频率泥石流物源主要

沟物源主要以沟岸坍塌、第四系沟床堆积物,坡面水土流失堆积物补给为主,风化作用程度低。中等频率泥石流物源供给方式不仅有沟床物质侵蚀冲刷,还有部分坍塌,泥石流活动频率要高于低频率泥石流,如海流沟、番字牌西沟泥石流暴发频率要稍高于关庙沟、干溪沟。

1.2 岩性

高频率泥石流沟内岩性软弱,易风化、剥落,多产

表 3 高频率与中低频率泥石流形成背景条件对比

Table 3 Formation conditions of debris flows with high, medium and low frequency

流域	面积/km ²	沟长/km	比降/‰	植被情况	气候、降雨	岩层、岩性	物源情况 + 暴发频次
蒋家沟	48.6	13.9	180	10% 左右	干旱半干旱气候	砂岩、板岩、千枚岩,白云岩,灰岩	门前沟约 5.2 × 10 ⁸ m ³ ,多照沟约 2.3 × 10 ⁸ m ³ 。每年暴发几次至 20 余次
古乡沟	25.2	8.7	256	—	西南季风影响,冰川发育	中游大量不稳定松散物约 4 亿方	1964 年 6 ~ 8 月崩滑 645 次,暴发泥石流 505 次。
文家沟	7.81	3.25	458.5	50%	中亚热带季风性湿润气候	以碎石块石、角砾以及砂为主,黏土含量较少	约 8000 × 10 ⁴ m ³ 松散堆积物。2008 - 2010 共计暴发 5 次
小岗剑	1.36	2.59	412	—	中亚热带季风性湿润气候	岩层节理裂隙发育,岩体较破碎。白云质灰岩	固体物源总量为 187.9 × 10 ⁴ m ³ 。汶川震后年共计发生 10 次
浑水沟	4.5	3.75	136	形成区 70% 左右	亚热带气候	混合花岗岩,片岩,变粒岩	7 个小型滑坡占流域面积 33%。每年发生泥石流 50 余次
加马其美沟	1.4	3	269	80% 以上	降雨充沛	片岩,变质较深,风化强烈	物源量达到 3900 × 10 ⁴ m ³ 。1977 年 6 - 8 月暴发泥石流 48 次。
芦花沟	1.13	4.5	284	大面积森林破坏	温带半湿润气候	砂岩、板岩为主,下部以千枚岩为主	约 500 × 10 ⁴ m ³ ,2004 年发生 3 次泥石流
马厂沟	6.25	3.25	238	达 42%	东南季风和西南季风影响	花岗岩,砂岩、页岩、泥岩、泥灰岩、砂岩等	达 500 × 10 ⁴ m ³ 。1937 - 1985 年共发生 6 次泥石流。
盐井沟	13.6	8.4	155	人为破坏严重	印度洋季风气候	变质岩、砂岩、泥质页岩;均质花岗岩	弃土堆积达 630 多万。1971 - 1985 共计 7 次泥石流
三滩中桥沟	1.83	2.1	334.2	70%	温带半湿润气候	硬质岩石为主。砂岩、粉页岩,砾岩,灰岩等	77.5 × 10 ⁴ m ³ 。隔 3 ~ 5 年暴发一次(1965,1969,1976)
白泥沟	5.6	3	150	—	南亚热带气候	松软砂页岩,泥灰岩	物源量达 1200 × 10 ⁴ m ³ 。平均每 2 ~ 3 年发生一次。
火烧沟	1.98	1.35	480	覆盖度低	年降水约 440 mm	千枚岩,页岩,灰岩	1700 × 10 ⁴ m ³ 。1969 - 1977 年暴发泥石流 30 次。
柳弯沟	1.97	1.23	290	覆盖度低	年降水约 440 mm	页岩,千枚岩,灰岩	崩塌面积 0.3 km ² ,物源达 1040 × 10 ⁴ m ³ 。平均每年暴发 11 次。
纸坊沟	18.98	15.7	43.4	6.3%	年降雨 971 mm	泥流区	1959 年 6 ~ 7 月发生 6 次泥石流
利子依达沟	24.32	8.09	173	90% 以上	雨量丰沛	火山岩为主。碳酸盐岩,砂岩、页岩,白云岩等	有大小滑坡、塌方等不良地质余处。1875 - 1978 共 6 次泥石流。
干溪沟	1.71	3.3	300	超过 80 %	东南季风和西南季风	棕红色钙质砂岩,岩性硬而脆,节理发育	第四系堆积物,1979 年 11 月 2 日暴发泥石流。
关庙沟	13.9	8.3	228	约 30%	半干旱半湿润气候	钙质砂板岩、灰岩泥质板岩、凝灰岩	不超过 10 × 10 ⁴ m ³ 。1984 年 7 月 18 日泥石流
海流沟	48.82	8.7	261	85% 以上	亚热带、温带、寒温带	花岗岩为主,其次为砂岩、泥岩和灰岩	约 171.23 × 10 ⁴ m ³ 。1932、1946 年暴发泥石流
冷木沟	9.4	4	212	90% 以上	多年平均降雨量 1101.5 mm	岩浆岩、灰岩	芦山震后 310 × 10 ⁴ m ³ 。1918 - 2012 共发生 5 次
黑山沟	16.8	6.9	187.6	80% 以上	年降水量 1200 ~ 1400 mm	板岩、白云岩	流域内山体稳定。1984 年 5 月 27 日发生泥石流
番字牌西沟	15.42	8.34	520	植被覆盖度较好	半干旱、半湿润东南季风气候	片麻岩、石英岩、花岗岩、白云岩	达 735 × 10 ⁴ m ³ 。1939 - 1991 年暴发过 5 次泥石流

注:以上泥石流沟是根据历史资料摘录;部分泥石流沟,如成昆铁路沿线是在治理前的泥石流暴发频率。

生黏性颗粒。如泥岩、页岩、千枚岩、片岩和砂岩等。这些岩层变质程度深,内部节理裂隙发育,抗风化能力弱,黏土含量较高,泥石流流体多黏性。单位面积物源补给量也远远大于其他岩性较坚硬的泥石流沟。中、低频率泥石流沟内的物源体以中、硬质岩性为主,如花岗岩、岩浆岩、钙质砂板岩、白云岩等。岩石硬度比高频率泥石流沟内岩性较高,变质程度和岩石碎裂程度也较低,部分泥石流沟的岩层夹杂少量泥质类页岩、凝灰岩。

1.3 植被

高频率泥石流沟内因重力侵蚀活动剧烈,多呈裸地景观。但部分高频率泥石流沟植被覆盖度大于中、低频率泥石流。如浑水沟溯源侵蚀区、加马其美沟、三滩中桥沟植被覆盖度超过 70%,但暴发频率极高。尤其是浑水沟和加马其美沟,泥石流暴发频率超过 40 次/年以上。加马其美沟流域植被覆盖度达到 90%,但是该流域山高、谷深、坡陡,片岩变质程度深,风化强烈,松散堆积物厚,加上所在区域雨季长,雨日多,土体含水量高,泥石流非常活跃。黑水县芦花沟虽植被覆盖高,但物源体以软弱砂岩为主,泥石流活动仍然活跃。中低频率泥石流沟内无大规模、成群、片分布的崩塌和滑坡,植被覆盖度较好。这些特殊泥石流沟所在区域内年平均降雨、最大 24 h 降雨以及最大 1 h 降雨普遍比高频率泥石流沟地区要高。这说明流域中植被覆盖程度只能在一定程度上对泥石流起到抑制作用,这种作用非常有限。

2 高频率泥石流雨量阈值对比

2.1 第一阶梯

第一阶梯的高频率泥石流主要为冰川型,并有部分暴雨泥石流。冰川泥石流可以是降雨诱发,也可以是长期高温激发冰崩、崩塌导致。如 2007 年 9 月波密县群发性泥石流,还有加马其美沟、古乡沟等。

重力侵蚀直接转化为泥石流的古乡沟和加马其美沟,泥石流暴发频率远大于暴雨型高频率泥石流。古乡沟海拔 4000 m 以上年降雨超过 2000 mm,泥石流多集中于 5~10 月,仅 1964 年 6 月 19 日—8 月 17 日发生泥石流上百次,1964—1965 年共计暴发泥石流 500 多次。2007 年 9 月波密群发性泥石流暴发时前期雨量 32.3 mm,日降雨量 20.4 mm。9 月 4 日康布沟和天摩沟泥石流暴发之前,累计降雨已达 18.7 mm,泥石流暴发前最大小时雨量仅 6 mm/h^[15]。根据加马其美沟的泥石流暴发雨量资料记录:激发泥石流 10 min 雨量不超过 2 mm,部分雨量甚至小于 1 mm,但这些泥石流暴发时的累计雨量 ≥ 20 mm。2007 年 9 月波密群发性

泥石流暴发时累计雨量达到 19.4 mm。

2.2 第二阶梯

该区泥石流主要受降雨影响,泥石流与雨季同期,多夜发。这些高频率泥石流源于物高位斜坡上的松散土石体,随含水量增加开始起动,在下滑过程中,受强烈扰动、液化形成泥石流雏形,初期泥石流规模不大,在运动的过程中通过侵蚀、裹挟松散物质才发展成一定规模的泥石流。因高频率泥石流激发雨量低,导致泥石流活动与雨季同期,多与峰值降雨时段重合或滞后。

我国暴雨泥石流预警模式多采用 10 min、30 min、1 h、24 h 单雨量指标或“前期雨量+实时雨量”组合模式制定泥石流临界、暴发线。如蒋家沟、大桥河、浑水沟、火烧沟等。火烧沟当 10 min 雨强达 8~10 mm,或 30 min 雨强达到 20 mm,必暴发泥石流,雨强小于 2~3 mm/10 min 时,一般不暴发泥石流^[16]。柳弯沟雨强为 2 mm/10 min,一次降水总量达到 7~10 mm 时,即可发生泥石流^[17]。浑水沟采用 10 min 雨强 12 mm 作为阈值。蒋家沟前期降雨在 0~10 mm,10 min 雨强达到 5 mm 时,泥石流多暴发^[18]。在前期降水量接近时,大桥河泥石流 10 min 雨强要平均高出蒋家沟 10 min 雨强 2 mm^[19]。

蒋家沟、浑水沟、火烧沟等大多数泥石流暴发时段与 10 min 峰值雨量时段重合,实际激发雨量要比加马其美沟要高(图 1)。尽管都是高频率泥石流,但处于第三阶梯青藏高原潮湿型气候区加马其美沟泥石流暴发所需要的临界雨量要小于处于第二阶梯蒋家沟、浑水沟、火烧沟和柳弯沟。此外,根据蒋家沟泥石流临界线和暴发线公式说明,90% 浑水沟泥石流暴发数据点位于蒋家沟泥石流临界线或暴发线以上区,蒋家沟泥石流临界线可以作为其他具有类似形成背景的高频率泥石流沟预警预报参照。

2.3 第三阶梯

该区泥石流主要以水石型为主,即高强度降雨激发沟道内形成一定水力条件的洪水强烈冲刷侵蚀河床形成。泥石流暴发时的雨量也比第一阶梯和第二阶梯泥石流暴发雨量要高。如北京山区 1968—1972 年,1989—1991 年间密云、怀柔区群发性泥石流暴发时一次性连续降雨总量超过 150 mm,最大 1 h 雨量超过 100 mm,泥石流暴发时当日雨量均超过 100 mm,最大超过 300 mm^[11]。该区泥石流物源体主要以硬质岩石为主,如花岗岩、片麻岩等,部分山峰海拔达到 2000 m,流域相对高差与第一阶梯和第二阶梯泥石流沟相比较较低,且岩石风化程度,新构造运动相对较

弱,泥石流激发雨量普遍较高。另外宝岛台湾、近海等部分地区多受台风强降雨袭击,泥石流暴发的激发雨

量也比大多数第一阶梯和第二阶梯的泥石流激发雨量要高^[20-21]。

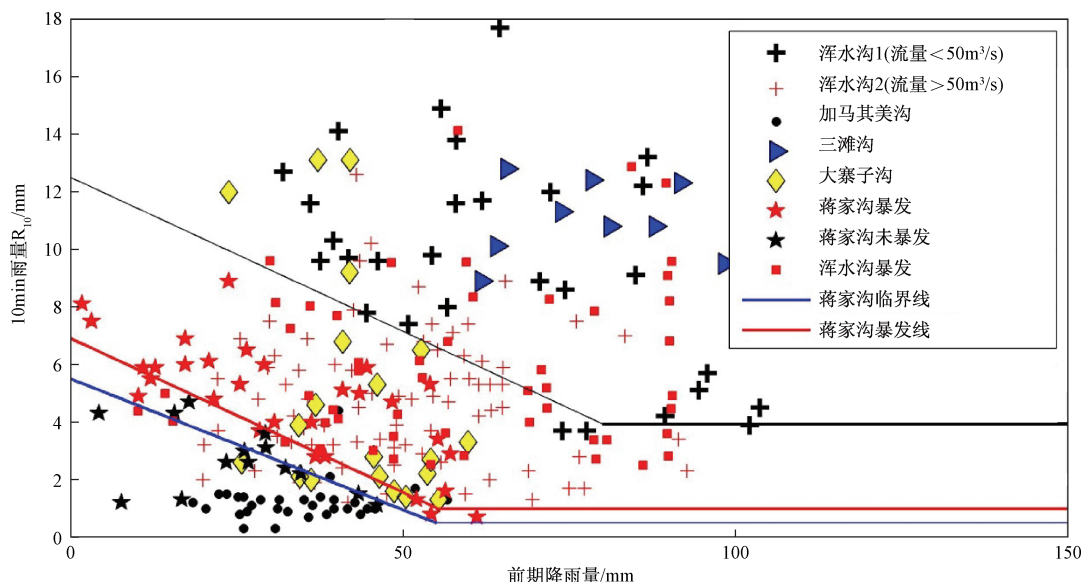


图1 国内高频率泥石流沟的前期有效雨量和实时雨量组合

Fig.1 The relationships of antecedent precipitation and 10 minutes rainfall of high-frequency debris flows in China

注: 加马其美沟 1976-1977 年暴发 59 场泥石流, 浑水沟 1976-1980 年共暴发 74 场泥石流; 金川县大寨子沟

1982-1985 年暴发 21 场, 为较高频率泥石流; 攀枝花三滩沟隔 3~5 年暴发一次泥石流, 为中频率。

3 汶川地震灾区的高频率泥石流

汶川地震后短时间内沿主断裂的山区城镇都遭受了高频泥石流灾害威胁, 如 2008 年 9 月 24 日北川^[22-23], 2010 年 8 月 13-14 日, 清平乡、龙溪河、白沙河流域, 映秀至耿达、岷江上游段^[24]。其中, 文家沟在 2008-2010 年共计暴发 5 次^[25], 小岗剑沟共计暴发 10 次^[26], 另外还有震中牛圈沟 2008-2011 年超过 6 次^[27]。2013 年 7 月 8-10 日, 整个汶川地震灾区遭遇大面积的连续长历时降雨, 映秀至汶川七盘沟、等多条小流域暴发泥石流^[28]。

3.1 汶川地震灾区高频率泥石流激发雨量特点

对灾区文家沟、小岗剑沟、牛圈沟以及几次群发性泥石流的雨量与其他低频率泥石流沟前期雨量与 10 min 雨量进行比较(图 2), 灾区高频率泥石流雨量具有以下特点:

(1) 汶灾区雨量记录多以 1 h 为基本监测频率, 图 2 中泥石流暴发时的 10 min 雨强是通过 1 h 雨量换算而来。灾区泥石流暴发时的 10 min 雨强与蒋家沟 10 min 雨强差别不大。文家沟、小岗剑沟、牛圈沟几次泥石流暴发时的平均 10 min 雨量(11.5~13.5 mm/10 min)与云南东川达德沟接近, 相当于中等频率泥石流(达德沟 1981 年暴发泥石流), 但灾区这几

条高频泥石流暴发时最低 10 min 雨量都小于 7 mm, 尤其是 2013 年 7 月 8-10 日映秀上游岷江段泥石流暴发时的 1 h 雨量不超过 30 mm。

(2) 尽管灾区泥石流物源量丰富, 但以上几条单沟泥石流事件中, 多数泥石流暴发时前期雨量及其持续时间比东川蒋家沟、浑水沟要多、长。震后泥石流的临界 10 min 或 1 h 雨量阈值与我国第二阶梯区其他泥石流多发区高频率泥石流激发雨量阈值接近。

3.2 雨量阈值分区

结合图 1、2 中不同频率泥石流激发雨量数据点对比得到:

(1) 中、低频率泥石流“前期雨量 + 10 min 雨量”组合相对于蒋家沟、加马其美沟等高频率泥石流而言, 前期降雨量近似情况下, 10 min 雨量要高。

(2) 根据蒋家沟泥石流暴发线、汶川地震灾区的高频率泥石流雨量值点, 以及国内一些中等频率、低频率泥石流可以将“前期雨量 + 10 min 雨量”组合关系图分成以下 5 个区:

I: 洪水、高含沙水流区。这个区间内一般不会产生泥石流, 但加马其美沟、古乡沟处在这个区间, 这是由于冰雪融化导致冰崩或崩塌直接液化形成泥石流引起。II: 高频率泥石流区。II₁: 低前期含水量条件高频率泥石流亚区: 这类高频率泥石流多分布于干旱、半

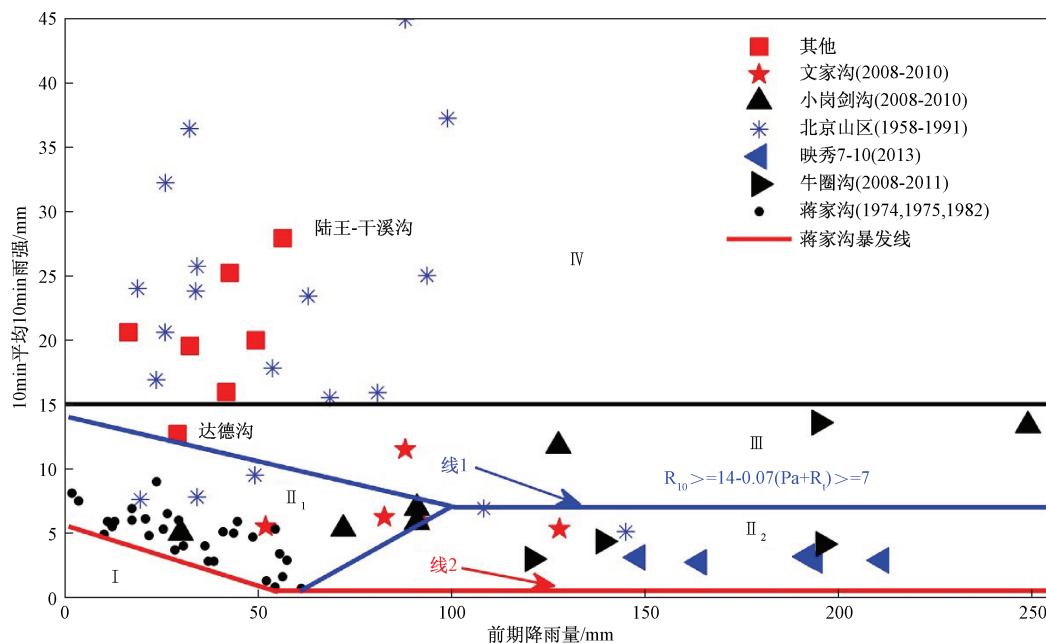


图2 不同暴发频率泥石流沟的前期雨量和10 min雨量组合

Fig. 2 The antecedent precipitation and 10-minute rainfall of debris flows with varied frequency

注：“■”包括中、低频泥石流如：陆王-干溪沟，关庙沟，黑山沟，达德沟，泸沽汉罗沟，天山阿拉沟，利子依达沟。

干旱,新构造活动剧烈,岩石风化程度高地区,一般10 min雨强不超过7 mm。 II_2 :高前期含水量条件高频率泥石流亚区;这类高频率泥石流主要分布于降雨充沛区,岩石风化程度低。 III :中等泥石流区:物源供给主要源于沟岸坍塌。 IV :低频率泥石流区:物源供给源于洪水对沟道沉积物的冲刷、掀揭。

4 我国高频率泥石流雨量区间

通过对我国不同区域的高频率泥石流沟的“前期雨量+10 min雨强”组合关系以及汶川地震灾区高频率泥石流雨量得到:

(1)高频率泥石流形成处于低10 min雨强条件下,而低频率泥石流激发阈值较高。干旱、半干旱地区的泥石流暴发受前期雨量影响要比亚热带,降雨充沛地区要低。

(2)第一阶梯西藏高寒山区因冰崩、滑坡直接液化形成的高频泥石流10 min雨强基本上都小于2 mm。可见影响该类泥石流主控因子是前期降雨量和气温。

(3)汶川地震灾区的高频率泥石流沟雨量数据点也落在高频率泥石流沟雨量阈值范围内。即通过我国高频率泥石流雨量资料建立起来的“前期雨量+10 min雨强”组合关系预报模式也可以对灾区高频泥石流进行预报,而且这些泥石流沟的数据不仅落在高频区内,还处于蒋家沟泥石流预报线之上。

(4)通过对我国高、中、低不同频率泥石流以及汶川灾区的高频率泥石流“前期雨量+10 min雨强”散点图,得出我国高频率泥石流发生的10 min雨量关系区间式(图2):

$$\text{线1: } 1 \text{ mm} < 5 - 0.094 \times (P_{a0} + R_t) \leq R_{10} \quad (1)$$

$$\text{线2: } 7 \text{ mm} \leq 14 - 0.07 \times (P_{a0} + R_t) \leq R_{10} \quad (2)$$

式中: P_{a0} ——泥石流暴发前一定时间的有效雨量;一般取前20d的雨量。

R_t ——泥石流暴发时刻前的当日降雨量;

R_{10} ——激发泥石流的10 min雨量。

5 结论

我国高频率泥石流具有不同的形成条件以及区域特征,通过对我国不同地域条件的泥石流形成背景条件和雨量特征分析得到如下结论。

(1)高频率泥石流沟内物源丰富,岩性软弱,以滑坡、崩塌为主的重力侵蚀严重;中低频率泥石流岩性较为坚硬,物源主要源于沟岸坍塌和沟床物质冲刷。大部分高频率泥石流沟内荒漠化景观突出;植被只能在一定程度上对泥石流产生抑制作用,控制泥石流活跃程度主要因子仍是物源储量和岩土体性质。

(2)三大阶梯的高频率泥石流雨量阈值随海拔递减,雨量阈值逐渐增加,泥石流激发因子从气温+降雨逐渐过渡到暴雨。第一阶梯的泥石流激发雨量低,多受

气温和前期降雨控制;第二阶梯多受前期降雨和实时雨量控制,第三阶梯主要受短历时雨强控制,阈值较高。

(3)除高寒山区古乡沟、加马其美沟外,大部分的高频率泥石流雨量值点都位于蒋家沟临界暴发线上,绝大部分高频率泥石流沟的10 min雨量都低于7 mm/10 min。

参考文献:

- [1] 吴积善,康志成,田连权. 云南东川蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
WU Jishan, KANG Zhicheng, TIAN Lianquan. Research and observation of debris flows in Jiangjia Ravine, Dongchuan [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [2] 中国科学院兰州冰川冻土研究所,甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京:人民交通出版社,1982.
Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Gansu Province Transportation Research Institute. Debris flow in Gansu province [M]. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [3] 唐邦兴,等. 西藏泥石流的特征[A]. 中国科学院成都地理研究所论文集[C]. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987.
TANG Bangxing, et al. Characteristics of debris flows in Tibet [A]. Scientific papers of institute of mountain hazards & Environment, Chinese academy of sciences [C]. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press, Chongqing Branch, 1987.
- [4] 吴积善,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:北京出版社,1993.
WU Jishan, et al. Debris flows and comprehensive mitigation [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [5] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊,2008,23(4): 317-323.
CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2008, 23(4): 317-323.
- [6] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
XU Qiang. The 13 August 2010 Catastrophic debris flows in Sichuan province: characteristics, generation and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596-608.
- [7] 杨东旭,陈晓清,游勇,等. 汶川地震区绵竹小岗剑沟泥石流发展趋势[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 701-708.
YANG Dongxu, CHEN Xiaoqing, YOU Yong, et al. The debris flow development trend of in Xiaogangjian gully in Mianzhu county, Wenchuan earthquake zone [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 701-708.
- [8] 唐川,李为乐,丁军,等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(1): 172-180.
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 China University of Geoscience, 2011, 36(1): 172-180.
- [9] 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.
XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan quake-hit area in 2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 501-509.
- [10] 钟敦伦,谢洪,王士革. 北京山区泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2004.
ZHONG Dunlun, XIE Hong, WANG Shige. Mountain torrents and debris flow in Beijing [M]. Beijing: The Commercial Press, 2004.
- [11] 王礼先,于志民. 山洪及泥石流灾害预报[M]. 北京:中国林业出版社,2001.
WANG Lixian, YU Zhimin. Forecasting of mountain torrent and debris flows [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2001.
- [12] 张信宝,刘江. 云南大盈江泥石流[M]. 成都:成都地图出版社,1989.
ZHANG Xinbao, LIU Jiang. Debris flow in Daying Jiang, Yunnan province [M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1989.
- [13] 朱平一,罗德富,寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势古乡沟[J]. 山地学报, 1997, 15(4): 196-299.
ZHU Pingyi, LUO Defu, KOU Yuzhen. Debris flow development trend of Guxiang Ravine, Xizang [J]. Journal of Mountain Science, 1997, 15(4): 196-299.
- [14] 田连权. 西藏波密加马其美沟泥石流运动与冲淤特性[A]. 泥石流论文集(1)[C]. 重庆:科学技术出版社重庆分社,1981.
TIAN Lianquan. Debris flow behavior of dynamic,

- scouring and deposition in Jiamaqimei ravine, Bomi Tibet [A]. Proceedings of debris flows (1) [C]. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press, Chongqing Branch, 1981.
- [15] 邓明枫,陈宁生,丁海涛,等. 2007年西藏东南部群发性泥石流的水热条件及其形成机制[J]. 自然灾害学报,2013,22(4):128-135.
- DENG Mingfeng, CHEN Ningsheng, DING Haitao, et al. The hydrothermal condition and formation mechanism of the group-occurring debris flows in the southeast Tibet in 2007 [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(4):128-135.
- [16] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
- KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainai, et al. Research of debris flows in China [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [17] 孟河清. 泥石流的发生和降雨[C]//第二届全国泥石流学术论文集. 北京:科学出版社,1991:143-148.
- MENG Heqing. Occurrence of debris flow and precipitation[C]//The Second National Debris Flow Conference Proceeding. Beijing: Science Press, 1991:143-148.
- [18] 王裕宜,邹仁元,刘岫峰. 泥石流启动与渗透系数的相关研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):76-82.
- WANG Yuyi, ZOU Renyuan, LIU Youfeng. Interrelated research of relationship between debris flow's trigger and permeational coefficient[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997,3(4):76-82.
- [19] 中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所,中国泥石流[M]. 北京:商务出版社,2000.
- Institute of Mountain hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences. Debris flows in China [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000.
- [20] Lin CW, Liu SH, Lee SY, et al. Impacts on the Chi-Chi earthquake on subsequent rain-induced landslides in central Taiwan [J]. Engineering Geology, 2006,86(2-3):87-101.
- [21] Lin GW, Chen H, Chen YH, et al. Influence of typhoons and earthquakes on rainfall-induced landslides and suspended sediments discharge [J]. Engineering Geology, 2008, 97(1-2):32-41.
- [22] 胡凯衡,游勇,庄建琦,等. 北川地震重灾区泥石流特征与减灾对策[J]. 地理科学,2010,30(4):566-570.
- HU Kaiheng, YOU Yong, ZHUANG Jianqi, et al. Characteristics and countermeasures of debris flows in Beichuan's meizoseismal area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010,30(4):566-570.
- [23] 唐川,梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):751-758.
- TANG Chuan, LIANG Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of The Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):751-758.
- [24] Tang C, van Asch TWJ, Chang M, 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.
- [25] 游勇,陈兴长,柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学,2011,26(4):68-72.
- YOU Yong, CHEN Xingchang, LIU Jinfeng. “8·13” Extra large debris flow disaster in Wenjia gully of Qingping township, Mianzhu, Sichuan province [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4):68-72.
- [26] 陈源井,余斌,朱渊,等. 地震后泥石流临界雨量变化特征—以汶川地震区小岗剑沟为例[J]. 山地学报,2013,31(3):356-361.
- CHEN Yuanjing, YU Bin, ZHU Yuan, et al. Characteristics of critical rainfall of debris flow after earthquake—a case study of the Xiaogangjian gully [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3):356-361.
- [27] 崔鹏,何思明,姚令侃,等. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M]. 北京:科学出版社,2011.
- CUI Peng, HE Siming, YAO Lingkan, et al. Formation mechanism and risk control of Mountain hazards in Wenchuan earthquake region [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [28] 曾超,崔鹏,葛永刚,等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报,2014,36(2):81-91.
- ZENG Chao, CUI Peng, GE Yonggang, et al. Characteristics and mechanism of buildings dammed by debris flow on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2014, 36(2):81-91.