震后泥石流的激发雨量特征
——以汶川地震和集集地震后泥石流为例*

马超[1,2,3]，胡凯衡[1,2]，赵晋恒[1,2,3]，雷发洪[1,2,3]

（1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041；
2. 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；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：对汶川地震灾区 2008－2010 年的暴雨泥石流以及我国台湾集集地震后 2001、2004、2009 台风引发的泥石流雨量过程进行了分析。结果表明，34.4 mm 是震后短时间内泥石流暴发的特征雨量；临界降雨强度/持续时间的关系式表明：在相同的降雨过程下，汶川地震灾区的泥石流比集集地震灾区的泥石流要容易暴发。通过泥石流暴发时段与峰值降雨时段的时间先后关系以及与前期雨量关系的研究，将强震后泥石流分为前期雨量控制型和短历时降雨控制型。其差异主要体现在超强短历时雨强直接触发和充足的前期雨量条件下，接近或达到 34.4 mm/h 的雨强触发。造成不同的泥石流控制类型的原因在于两地震对泥石流影响程度差异以及激发的雨量过程特征不同。

关键词：汶川地震；集集地震；降雨；台风；泥石流
中图分类号：X4；P642.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2013)04－0089－06

0 引言

强震后频繁的泥石流灾害说明震后泥石流活动受松散物源量控制，这使具有不同松散物源量的泥石流沟可能具有不同的特征雨量。短时间内可获取降雨数据少，前期雨量计算中衰减系数确定以及临界判别条件关键问题尚未解决等，是震后泥石流预警预报面临的诸多难题之一。因此，震后泥石流的预警预报问题是国内外学者关注的焦点。例如汶川地震灾区、我国台湾地区集集地震灾区的泥石流触发特征雨量到底多少，泥石流受前期降雨控制还是受短历时暴雨控制，泥石流暴发过程与降雨过程中峰值降雨时段的关系是否密切等问题非常值得关注。

汶川地震和集集地震使极震区斜坡体瞬间遭到强烈破坏，产生大量崩塌、滑坡等松散碎屑体，加上大面积的坡面裸露并加强片蚀和线蚀作用使后续的泥石流以“低阈值，高频率，高量级，群发性，多发生在小流域”等为特点[1－3]。泥石流在震后短期内非常活跃，运动过程中剧烈下切沟道底床和、沟岸，使更多的松散物质参与其中，因而实测泥石流洪峰流量比雨洪修正法估算值要大，冲出总量也要大[4－5]，造成震后许多泥石流防治工程损毁。震后短期内工程防治措施实施起来困难并难以达到有效防治的目的，因此防治“软”措施－泥石流预测预报仍然是震后泥石流防治的首选。本文分别对汶川地震灾区 2008－2010 年暴雨泥石流和集集地震后 2001、2004、2009 年台风激发的泥石流事件为研究对象，对触发其形成的雨量过程进行分析，进一步认识震后泥石流触发的条件，希望为震后灾区泥石流防灾减灾、预测预报以及建立相应监测预警系统提供参考。

1 区域背景和典型泥石流

1.1 汶川地震灾区

强震不仅为泥石流提供松散物源，还对空间分布起控制作用。在发震断层穿过的地方，岩体破碎，内部应力集中，单位面积的松散物源更多。

* 收稿日期：2013－03－22　　修回日期：2013－04－28
基金项目：中国科学院重点部署项目(KZZD－EW－05－01)；中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目(110900K235)；国家自然科学基金重点项目(41030742)
作者简介：马　超(1986－)，男，四川盐亭人，博士生，主要从事山地灾害及其预警预报研究. E－mail：sanguoxumei@163.com.
通讯作者：胡凯衡(1975－)，男，江西瑞金人，研究员，主要从事泥石流减灾理论与技术、泥石流动力学过程和数值模拟研究. E－mail：Khhu@imde.ac.cn.

震后的泥石流也多沿发震断层分布，尤其是高地震烈度区、转换断层地段，泥石流分布密度大，造成的危害也相当严重。如北川地区的曲山镇、陈家坝、擂鼓镇、绵竹市地区的清平乡、天池乡，以及距离震中较近的都江堰市龙池镇龙溪河流域（该流域被龙门山前山、后山、以及中央断层穿过），另外还有位于映秀镇周边的渔子溪以及岷江段。汶川强震后危害比较严重的泥石流灾害也主要发生在这些地区[6-11]。泥石流暴发点主要位于龙门山前山与后山交界地带，也是四川盆地向川西高原的过渡地带。该区被四川省著名“鹿头山暴雨区”覆盖，区域内降雨充沛，干湿季节分明，立体气候特征明显。平均年降雨量超过 1 200 mm，夏季(6－9 月) 降雨占年均降雨量的 60% 以上。

1.2 集集地震灾区

1999 年我国台湾地区“9·21”集集地震后的几场灾害性泥石流主要为台风桃芝、蒲公英、艾利、莫拉克所激发，相应的雨量以及降雨持续时间远大于汶川地震灾区的几次泥石流雨量过程。区域上，我国台湾处于欧亚大陆和菲律宾板块以及冲绳板块的交界处，最主要的断层为车笼埔断层、东部池上断层以及潮州断层。其中集集地震的主断层车笼埔断层与大茅埔－双冬断层穿越南头县、雾峰乡、竹山乡等，泥石流也主要集中在这些地区[12]；山脉大多呈北北东－南南西走向，主要地形为高山和平原；气候受亚热带与热带季风气候控制，冬季受蒙古高压所带来的东北季风以及夏季盛行西南季风影响，每年 6 月至 9 月是台风多发季节，造成降雨年际和空间分配极不均匀。年均降雨量超过 2 500 m，远大于汶川地震灾区的年均降雨量[13]。

2 雨量特征分析

2.1 平均雨强和降雨历时关系

本文所研究的泥石流事件如表 1 所示。在激发北川“9.24”泥石流的降雨过程中，9 月 23 日 23：00－9 月 24 日 00：00 雨强达到 60 mm，9 月 24 日 05：00－06：00 雨强达到 41mm[4,6]。9 月 23 日 9：00 至 21：00 这段时间内未出现降雨，由于该段时间短，加上降雨之前 9 月 1－22 日该区域处于异常干燥期，且雨量不大，故该段时间(9 月 23 日 9 点之前的降雨)的降雨几乎全部入渗进入土体，可以将该整个降雨过程中 9 月 23 日 9：00－21：00 无降雨时段忽略。2010 年 8 月 13 日、8 月 19 日清平乡以及 8 月 14 日都江堰市龙池、虹口和映秀地区泥石流的降雨过程都是连续的降雨过程。集集地震灾区的泥石流多为台风带来的长时间、超强降雨引发，也是连续的降雨过程。以 2009 年莫拉克台风为例：据陈友兰溪雨量记录，整个降雨过程最大小时雨量为 123 mm，远大于汶川地震灾区几次泥石流事件的最大小时雨量和激发雨量。在 48 h 内的总降雨量达到 2 361 mm，10 h 以及 40 h 内的最大雨强超过 200 年一遇。该强降雨过程造成该流域共 37 处泥石流沟暴发泥石流[14-16]。

从图 1 中可以看出，汶川地震灾区的几次暴雨激发泥石流及集集地震区台风触发泥石流的降雨过程中，平均雨强和降雨持续时间都有一个临界关系，该关系式分别为

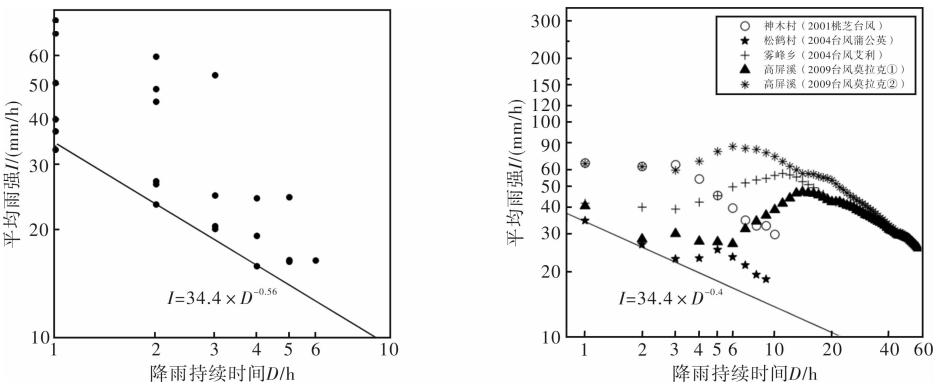
汶川地震灾区：$I = 34.4 \times D^{-0.56}$。 (1)

集集地震灾区：$I = 34.4 \times D^{-0.4}$。 (2)

式中：I 为平均雨强，D 为该平均雨强的降雨历时。两个极震区泥石流的特征雨量都为 34.4 mm/h。

表 1 本文选取的汶川地震灾区以及集集地震震后泥石流事件

区域	震级	≥6.0 余震次数/次	震源深度/km	地震持续时间/s	地表破裂长度/km	泥石流暴发点	泥石流事件
汶川地震灾区	8.0	8	14	120	220(映秀－北川断层)；100(彭县－灌县断层)	北川	2008 年“9.24”
						清平	2010 年“8.13”
						都江堰	2010 年“8.13”
						都江堰	2010 年“8.18”
						映秀镇	2010 年“8.14”
集集地震灾区	7.6	4	7	30	80(车笼埔断层)	南投市神木村	2001 年台风桃芝
						台中市松鹤村	2004 年台风蒲公英
						新竹县雾峰乡	2004 年台风艾利
						高屏溪小林里乡	2009 年台风莫拉克
						高屏溪新发乡	2009 年台风莫拉克



（a）汶川地震灾区　　（b）集集地震灾区

图 1　研究区泥石流暴发过程的 $I-D$ 关系

但该雨量是针对整个区域而言，在局部小范围，该特征雨量可能还要小些。该特征雨量的意义在于：当雨强小于该值时，泥石流暴发的可能性低，当超过该值时，泥石流暴发的可能性大。该特征雨量值是通过获得一些泥石流暴发过程的降雨资料再对比分析雨强和历时的下限关系得到的，比利用蒋家沟泥石流日雨量累计频度关系和苏保河的日雨量推测得到的特征雨量值 37.84 mm 要小[17]。

汶川地震后泥石流灾害多为短历时强降雨引起，以 2010 年 8 月 13 日都江堰龙池镇龙溪河流域的泥石流为例：该流域大约在 16：00－17：00 时暴发泥石流，而相同时段的降雨量达到 75 mm，大于本文以及文献[17]中提到的特征雨量。该时段的集中强降雨引发了该流域大面积的泥石流暴发[7]。汶川地震与集集地震相比较(表 1)，主震震级大、持续时间长、震源深度深、发震断层造成的地表破裂也较长，对山体造成的破坏也更为严重，为泥石流提供的松散物源量也更多[18－19]。因此，从式(1)和(2)中降雨历时 D 的幂指数值也反映了汶川地震对泥石流的影响更明显。D 的幂指数值说明：在相同降雨的过程条件下，汶川地震灾区的泥石流更容易暴发。

2.2　泥石流暴发过程与雨量过程

一般泥石流暴发时间要稍滞后于峰值降雨时段。根据蒋家沟的资料分析，当前期降雨在 0～10 mm 时，蒋家沟泥石流触发的 10 h 雨强为 5 mm[20]，当雨强达到该阈值时，泥石流暴发时间要稍滞后于激发雨强 0～1 h。但两地震灾区的泥石流暴发不仅并不全部都与峰值降雨时段重合，而且有些泥石流暴发时间滞后于峰值降雨时段较长时间。这说明震后泥石流与降雨过程和含水量紧密相关，降雨对两个地震区的泥石流形成机理以及过程存在差异。这里通过泥石流暴发时间与峰值降雨时段先后顺序，以及暴发前的前期累计雨量和泥石流暴发的关系进行分析，将震后泥石流分为前期降雨控制型和短历时雨强控制型两类。前期降雨控制型即为当该次降雨过程的累计雨量达到一定程度后，在临界雨强触发下泥石流暴发，且泥石流暴发时段与峰值降雨时段时间上不一定重合；短历时雨强控制型为激发雨强不仅达到阈值而且还可能远大于阈值(表 2)，且泥石流暴发时段与峰值降雨时段时间上重合。

(1)前期降雨控制型

前期雨量对泥石流形成具有很重要的作用，一般认为主要影响流域内物源物质的含水量空间分布和大小、地表径流以及流域产、汇流时间和洪峰流量大小[21]。由于震后的泥石流降雨观测数据较少，日降雨与含水量的关系尚不明确，目前还没有适合于震后泥石流预测预报中计算前期有效雨量的方法。这里只对汶川地震和集集地震后的几次典型泥石流中前期降雨控制型的泥石流进行分析。

汶川地震灾区属于前期降雨控制型的有北川“9·24”、清平“8·13”和映秀“8·14”泥石流。北川“9·24”和映秀“8·14”泥石流其泥石流暴发时段与峰值降雨时段不重合，清平“8·13”泥石流暴发时段与峰值雨强重合。北川“9·24”降雨过程中峰值降雨时段出现在 9 月 23 日 23：00－24：00，雨强为 60 mm/h，而泥石流是 9 月 24 日 05：00－6：00 暴发，激发雨强为 41 mm/h。峰值降雨时段近60 mm 的雨量未触发泥石流原因在于此前的累计雨量较少，且有近 12 h 的无雨时段，可见该次泥石流前期降雨贡献尤为重要。而映秀“8·14”泥石流激发雨量仅仅 16.4 mm，前期降雨持续近 10 h，累计雨量达到 162.1 mm，可见前期雨量控

表 2 汶川地震灾区和集集地震灾区泥石流灾害的雨量统计

地区	泥石流事件	峰值降雨时段雨强/(mm/h)	峰值降雨时段	泥石流暴发时间	暴发前的前期降雨/mm	前期降雨过程中有降雨时段持续时间/h	泥石流暴发雨强/(mm/h)
汶川地震灾区	北川“9.24”	61	09-23/T23:00-09-24/T00:00	09-24/T05:00-T06:00	272.7	12	41
	清平“8.13”	38.7	08-13/T01:00-02:00	08-13/T01:00-02:00	137.6	7	38.7
	映秀“8.14”	32	08-13/T01:00-02:00	08-14/T02:00-03:00	162.1	10	16.4
	都江堰“8.13”	75	08-13/T16:00-17:00	08-13/T16:00	21.7	2	75
	都江堰“8.18”	69	08-18/T20:00-21:00	08-18/T20:00	94.3	3	69
集集地震灾区	南投市神木村	66.5	07-30/T07:00-08:00	07-30/T09:00-10:00	236.2	9	64
	台中市松鹤村	34.8	07-03/T11:00-12:00	07-03/T11:00-12:00	525	48	34.8
	新竹县雾峰乡	73.3	08-25/T05:00-06:00	08-25/T10:00-11:00	1 246	58	41.9
	高屏溪小林里乡	76	08-08/T16:00-17:00	08-09/T04:00-05:00	1 566	60	41
	高屏溪新发乡	103	08-08/T16:00-17:00	08-08/T20:00-21:00	1 382	48	64.2

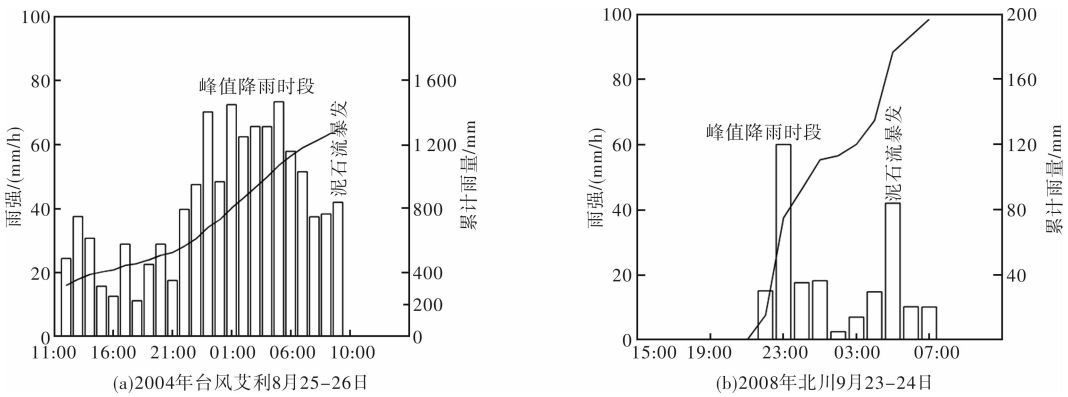
制作用非常明显。清平“8·13”泥石流为典型的前期雨量控制型，该区域在震后物源条件极为丰富。“8·13”泥石流暴发之前的降雨持续时间约 7 h，累计雨量不超过 50 mm，因此前期降雨可以充分入渗进入沟道或坡面的松散物源，由于该区域山高谷深，沟道比降大，沟道中的松散物源具有较大势能条件，在 00：00-01：00 该时段 37.8 mm 的雨量触发下，泥石流几乎同时暴发。

集集地震灾区几次台风激发的泥石流事件中，都为前期降雨控制型。分别滞后峰值降雨时段 1 h、0 h、5 h、12 h、4 h。尽管 2004 年台风蒲公英激发松鹤村的泥石流暴发时间与峰值降雨时段重合，但是在达到峰值降雨时段之前，每小时的雨量都小于 34.4 mm，大部分时段的雨强都小于 20 mm/h，不足以激发泥石流，该次泥石流暴发时间恰好与该降雨过程中峰值雨强超过 34.4 mm 时的降雨时段重合。而激发其他泥石流事件的降雨过程中虽然有某些时段峰值降雨量大于触发雨量，但泥石流都未暴发。这说明，前期累计雨量不足，泥石流不能暴发(图 2)。

(2)短历时雨强控制型

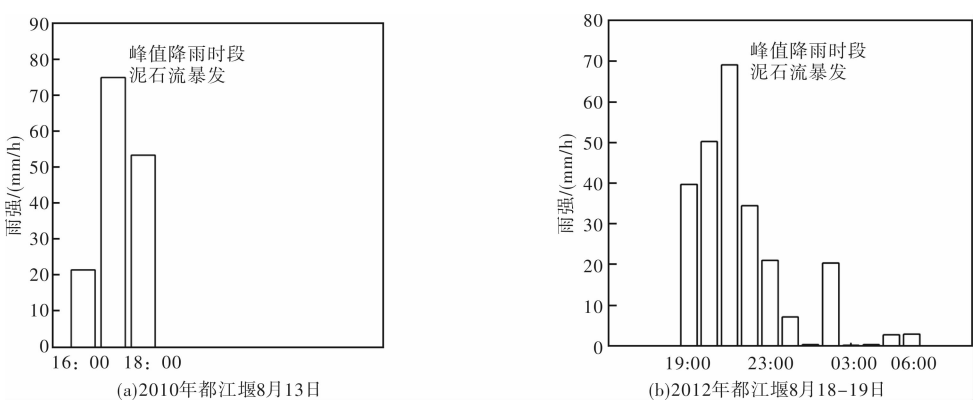
都江堰地区龙溪河流域“8·13”和“8·18”是

短历时强降雨控制型，其泥石流暴发时段与峰值降雨时段重合。不仅前期降雨持续时间短，峰值降雨时段的雨强比 34.4 mm 两倍还要多，远大于汶川地震灾区和集集地震灾区几次泥石流事件的触发雨强(图 3)。该流域距离映秀较近，且龙门山前山、后山以及中央断层都横穿该流域而过，大量的滑坡、崩塌、裸露坡面出现，增加了汇流过程和径流过程。流域水系发育，流域内冲沟、支沟非常多，短时间内的高强度降雨可以在极短的时间内形成具有一定水动力条件的沟道水流，与沟底充足的松散物质掺混形成泥石流。如“8·13”泥石流过程总计暴发的 45 处泥石流中有 33 处为沟谷型泥石流[10]而坡面泥石流较少。因此该流域两次泥石流均属于短历时降雨控制型。



(a)2004年台风艾利8月25–26日　　(b)2008年北川9月23–24日

图 2　汶川地震灾区和集集地震灾区前期雨量型泥石流雨量过程



(a)2010年都江堰8月13日　　(b)2012年都江堰8月18–19日

图 3　汶川地震灾区短历时暴雨控制型泥石流雨量过程

3　结论

汶川地震和集集地震都对后续泥石流活动造成很大的影响。通过对两个地区的泥石流灾害雨量特征进行分析得到如下结论。

(1) 汶川地震灾区 2008－2010 年和集集地震灾区 2001、2004、2009 的泥石流特征雨量为 34.4 mm。但临界 $I-D$ 关系式中，降雨持续时间 D 的幂指数相比，汶川地震灾区要小于集集地震灾区，说明汶川地震灾区的泥石流在遭受同样强度的降雨条件下比集集地震灾区的泥石流更容易暴发。

(2) 根据降雨过程峰值降雨时段与泥石流暴发时段的关系将这些泥石流分为前期雨量控制型和短历时雨强控制型。其中汶川地震灾区北川“9·24”、清平“8·13”和映秀“8·14”为前期雨量控制型，都江堰“8·13”、“8·18”为短历时暴雨控制型。集集地震灾区的几场泥石流均为前期雨量控制型。

(3) 虽然都受到了强震的影响，但汶川地震的震级、震源深度、主断裂带长度、地震延时都要比集集地震要大。地震影响对泥石流影响程度不同以及不同暴雨类型对研究区的泥石流控制类型起到了作用。这主要表现为对松散物源的控制程度不同以及激发泥石流的雨量过程不同。

参考文献：

[1] 钟敦伦. 试论地震在泥石流活动中的作用[C]//中国科学院成都地理研究所. 全国泥石流学术会议论文集(1). 重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：30－35.

[2] 崔鹏，庄建琦，陈兴长，等. 汶川地震区震后泥石流活动特

征与防治对策[J]. 四川大学学报：工程科学版，2010，42(5)：10－19.
[3] Shieh C L, Chen Y S, TSAI Y J, et al. Variability in rainfall threshold for debris flow after Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24：177－188.
[4] 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.
[5] Ma C, Hu KH, Tian M. Comparison of debris-flow volume and activity under different formation conditions [J]. Natural Hazards. doi：10. 1007/s11069－013－0557－6. 2013. 02. 010.
[6] 铁永波，唐川. 四川省北川县暴雨泥石流的发育与汶川地震的响应特征[J]. 灾害学，2011，26(4)：73－75.
[7] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害、成因与启示[J]. 工程地质学报，2010，18(5)：596－608.
[8] 苏鹏程，韦方强，冯汉中，等. "8·13"四川清平群发性泥石流灾害成因及其影响[J]. 山地学报，2011，29(3)：337－347.
[9] 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.
[10] 余斌，马煜，张健楠，等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报，2011，29(6)：738－746.
[11] Tang C, Zhu J, Ding J, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslide, 2011, 8：485－497.
[12] Chen H. Controlling factors of hazardous debris flow in Taiwan [J]. Quaternary International, 2006, 147：3－15.
[13] Huang C C. Critical rainfall for typhoon-induced debris flows in the Western Foothills, Taiwan [J]. Geomorphology, 2013, 185：87－85.
[14] Wu H L, Chen S C, Chou T Y, et al. Debris flow disaster mitigation on early warning and evacuation after the Chichi Earthquake in Taiwan [J]. The Australasian Journal of Disaster and Trauma Studies, 2010, 2：. 1－13.
[15] Jan C D, Hsu Y C, Wang J S, et al. Debris flows and landslides caused by typhoon Morakot in Taiwan [M]. Proceedings of the 5th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation/Mechanics, Prediction, and Assessment, Padua, Italy, June 7－11, 2011, Italian Journal of Engineering Geology and Environment-Book：Casa Editrice Universita La Sapienza, Rome, Italy, p. 675－683. DOI：10. 4408/IJEGE. 2011－03. B－074.
[16] Chen J C, Huang W S, Jan C D, et al. Rainfall Conditions for the Initiation of Debris Flows during Typhoon Morakot in the Chen-Yu-Lan Watershed in Central Taiwan [M]. Proceedings of the 5th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation/Mechanics, Prediction, and Assessment, Padua, Italy, June 7－11, 2011, Italian Journal of Engineering Geology and Environment-Book：Casa Editrice Universita La Sapienza, Rome, Italy, p. 31－36. DOI：10. 4408/IJEGE. 2011－03. B－004.
[17] Hu K H, Cui P, Wang C C, et al. Characteristic rainfall for warning of debris flows. Journal of Mountain Science, 2010, 7(3)：207－214.
[18] 周荣军，黄润秋，雷建成，等. 四川汶川8.0级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(11)：2173－2184.
[19] Zeng Y, Chen C H. Fault rupture process of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2001, 91：1088－1098.
[20] 王裕宜，邹仁元. 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.
[21] 崔鹏，杨坤，陈杰. 前期降雨量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)：11－15.

Analysis of the Rainfall Parameters of Debris Flows after Strong Earthquake
——Example of Debris Flows after Wenchuan Earthquake and Chichi Earthquake

Ma Chao[1, 2, 3], Hu Kaiheng[1, 2], Zhao Jinheng[1, 2, 3] and Lei Fahong[1, 2, 3]
(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610041, *China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu* 610041, *China*; 3. *Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This paper proposed a study on the rainfall of debris flows between 2000 and 2010 in Wenchuan earthquake zone, and debris flows triggered by typhoon of 2001, 2004, and 2009 in Chichi earthquake zone. The analysis reveals that a rainfall intensity of 34.4 mm/h is the characteristic threshold of debris flows after a short time of strong earthquake. Both of the two relationships between mean rainfall intensity and duration in Wenchuan and Chichi earthquake zone tell us that the debris flows in Wenchuan earthquake zone can be triggered more easily when suffered a same storm. The selected debris flows after strong earthquake can be classified into pre-storm control pattern and short-duration rainfall control pattern by the relationship of the chronological order between debris flow occurrence and time of peak rainfall during a rainstorm, as well as the triggering rainfall when debris flow occurred. The short-duration rainfall control pattern refers to that debris flows were triggered by rainfall intensity far beyond 34.4 mm/h, and debris flow occurrence coincides with the peak rainfall interval. The pre-storm control pattern debris flows refers to that debris flows were triggered by a rainfall intensity close to 34.4 mm/h while cannot been triggered without insufficient rainfall even there is a larger rainfall intensity than 34.4 mm/h before the triggering rainfall interval. Finally, the reasons why these debris flows were triggered differently may attribute to the properties of strong earthquake, such as the magnitude, ground shaking duration, and influence on volume of loose materials as well as the different rainstorm.

Key words: Wenchuan earthquake; Chichi earthquake; rainstorm; typhoon; debris flow