

雷发洪, 胡凯衡, 胡云华, 等. 汶川地震灾区震后泥石流激发雨量研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 199–203. [Lei Faihong, Hu Kaiheng, Hu Yunhua, et al. Excitation Rainfall of Debris Flows in the Stricken Area of Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 199–203.]

汶川地震灾区震后泥石流激发雨量研究^{*}

雷发洪^{1,2,3}, 胡凯衡^{1,2}, 胡云华^{2,3}, 马超^{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: 降雨作为泥石流的触发因素, 常用于泥石流的预警预报, 一个地区泥石流发生与否与前期有效累积降雨量和激发雨量密切相关。在对汶川地震灾区已发泥石流灾害的18个泥石流案例的1 h激发雨量与流域面积、沟谷长度、松散物质储量、岩石类型、地震动峰值加速度、土地利用类型以及泥石流沟的坡度等影响泥石流活跃性的因子进行主成分分析基础上, 选取了6个主成分对泥石流1 h雨量激发系数进行拟合, 得出了1 h激发雨量的计算方法。并讨论了该方法在地震灾区的适用性, 可为地震灾区泥石流灾害的预警预报提供参考。

关键词: 地震灾区; 泥石流; 激发雨量; 汶川地震

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)02–0199–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.02.037

降雨型泥石流在世界上分布广泛, 成灾频繁, 由降雨触发的泥石流可根据降雨特征以及影响泥石流激发雨量大小的因子对泥石流易发区域进行预警预报。Caine、Chen^[1–2]等根据泥石流激发过程的实时雨量得到激发泥石流的降雨强度与降雨历时的关系; Cannon^[3–5]等总结了美国火灾发生区域不同流域泥石流的激发雨量数据, 指出火灾发生后激发泥石流的1 h雨强随物源量减小而逐年增大; Barclay、Matthews^[6–7]等对蒙特塞拉特岛爆发的火山泥石流分析, 发现火山爆发为带来的大量物源以及流域内植被受到严重破坏, 使得火山爆发后降雨型泥石流的激发雨量显著低于火上爆发前的水平; 台风带来的特大暴雨引发滑坡泥石流灾害是台风灾害的主要表现形式, huang^[8]分别利用1 h雨强与降雨持续时间的关系、1 h雨强与累计降雨量的关系、日降雨量与前期日降雨量的关系对“莫拉克”诱发的32个泥石流案例进行分析, 得到泥石流激发雨量的取值范围较大, 单独利用经验性泥石流激发雨量的方法很难对降雨诱发泥石流做出预测; 谭万沛、Chen等^[9–10]利用收集的大量泥石流灾害调查和雨量资料, 经过统计分析得出了四川地区区域性泥石流爆发的临界雨量与

相应地区的降雨条件有很好的对应关系; 唐川、谢洪^[11–13]等在汶川地震发生后, 对地震灾区泥石流的发展趋势也做出了预测; 强震后一段时间内, 与震前相比, 泥石流的爆发由物源控制性转变为降雨控制性。泥石流激发雨量显著低于震前, 短期内泥石流的数目、规模和爆发频率都会大大增加^[14–16]。通过前人的研究可以发现, 影响流域泥石流激发雨量大小的因素主要有降雨类型、物源条件、地形地貌条件、地层岩性、地质构造、区域降雨条件。

汶川8.0级大地震之后, 时隔5年时间, 雅安芦山再次发生7.0级强烈地震。震后泥石流活动与降雨条件密切相关, 泥石流的激发雨量降低, 其活动与降雨往往具有相同的活动趋势。本文基于这样一个简单的模型, 即泥石流1 h激发雨量与局地的年最大1 h降雨量均值成正比例关系, 其比例系数为流域泥石流活跃性影响因子的函数。通过对汶川地震灾区2008年至2011年部分泥石流灾害的地形、地层岩性、地震烈度、土地利用类型等影响泥石流活跃性的因子进行统计分析, 利用主成分分析的方法重新构建了6个相互独立的影响因子, 并对沟谷泥石流1 h临界激发雨量和年最大

^{*} 收稿日期: 2013–09–10 修回日期: 2013–10–23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(2011CB409902); 中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目

作者简介: 雷发洪(1988–), 男, 四川三台人, 硕士研究生, 主要从事泥石流研究。E-mail: leifahong1988@sina.com

通讯作者: 胡凯衡(1975–), 男, 江西瑞金人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事泥石流动力学研究和减灾研究。

E-mail: khhu@imde.ac.cn

1 h降雨量均值的比例系数 C 进行拟合, 构建比例系数的函数关系。由此可计算地震灾区震后泥石流 1 h 临界激发雨量, 结合实时降雨数据可对泥石流灾害进行预警预报。

1 地震灾区泥石流概况

汶川地震极重灾区主要沿地震断裂带—龙门山断裂带分布, 构造运动活跃。出露地层时代主要有: 元古代(Pt)、古生代志留系(S)与二叠系(P)、中生代三叠系(T)以及新生代(Kz)。岩石类型主要为: 花岗岩、灰岩、白云岩、砂岩、页岩、千枚岩、板岩和新生代的松散堆积砂砾石粘土。该区处于四川盆地和青藏高原的过渡地带, 地形起伏较大, 属于亚热带季风性湿润气候, 冬季干冷少雨, 夏季炎热多雨潮湿, 年降雨 70 ~ 80% 集中在夏季。由地震引发的滑坡崩塌产生的大量松散岩土体是泥石流发生的物质来源。重灾区在降雨作用下相继发生多次泥石流灾害。如震中牛圈沟震后 3 年爆发 9 次大规模泥石流; 2008 年北川“9·24”泥石流灾害事件, 北川县城区域发生 72 处泥石流灾害^[17]; 2010 年 8 月 13—14 日清平、映秀、都江堰相继发生群发性泥石流^[18]。地震灾区

频繁表 1

各沟泥石流特征指数

沟名	流域面积 A/km^2	主沟长 L/km	沟床比 降 $i/\%$	单位面积物源量 $V/$ $(10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2)$	沟岸坡 度 $D/^\circ$	地震烈 度 $I/$ 度	紧固 系数 f	侵蚀 敏感性 S	激发雨量 R_s/mm	年最大小时降雨量 均值 R_{60}/mm
牛眠沟	10.4	5.8	0.207	192.31	42.5	XI	3	1	41	24.18
双养子沟	2.45	2.9	0.379	5.06	50	XI	20	2	75	28.78
烂泥沟	5.4	5.07	0.281	9.04	45	XI	3	2	37.4	52.73
红椿沟	5.35	3.6	0.358	66.92	27.5	XI	16	1	16.4	27.59
干沟	33.86	8.8	0.398	1.04	45	X	15	2	75	27.59
魏家沟	1.54	2.3	0.478	227.27	27.5	XI	9	5	41	55
苏宝河	72.21	14.7	0.093	1.2	25	XI	9	5	41	55
走马岭	5.78	3.39	0.165	276.82	40	X	3	2	37.4	50.1
孙家沟	1.54	2.4	0.445	50	57.5	XI	18	4	75	28.77
大沟	0.8	2.027	0.42	180	45	XI	10	5	41	55
蔡家沟	0.45	1.12	0.47	12.44	50	X	11	1	37.4	54.45
滴洞沟	0.18	0.48	0.586	8.89	50	X	11	2	37.4	54.45
簸箕沟	0.844	0.125	0.34	5.92	49	X	11	2	37.4	54.45
八一沟	8.63	4.45	0.376	87.79	50	XI	20	2	75	27.59
大水沟/ 唐家山	0.72	1.75	0.429	126.39	38	XI	9	4	27.4	55
唐房沟	0.72	1.75	0.304	327.78	35	XI	5	0	41	51.54
肖家沟	7	3.46	0.426	84.29	40	XI	18	1	37.4	21.63
彻底关	16.64	3.5	0.143	1.8	50	XI	16	1	22	20

注: 紧固系数是不同岩石类型的紧固系数; 侵蚀敏感性根据不同土地利用类型侵蚀敏感影响分级标准确定^[21]。

的爆发泥石流, 进一步加剧灾情(图 1)。

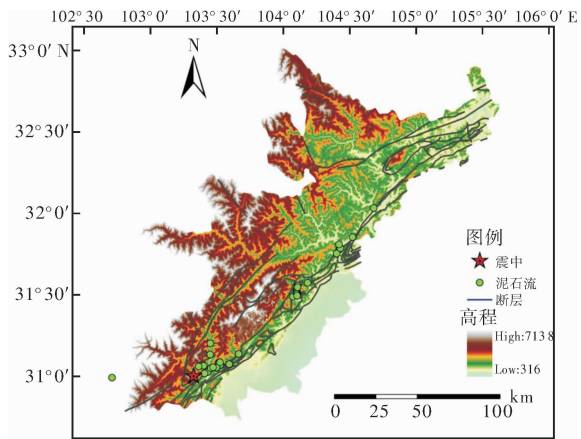


图 1 泥石流分布位置

本文选取的泥石流灾害事件分布于北川、汶川、都江堰等汶川地震灾区。数据主要来源于已发表的学术期刊论文和灾区地质灾害勘察报告^[19], 数据主要包括泥石流沟流域面积 S 、主沟长度 L 、沟床平均比降 i 、沟岸坡度 D 、单位面积松散物源量 V 、不同岩石类型的紧固系数 f 、不同土地利用类型的侵蚀敏感性 S 、泥石流灾害的 1 h 激发雨量 R_s 和年最大 1 h 降雨量均值 R_{60} 。因为地震灾区面积大, 难以获取局地年最大 1 h 降雨量, 本文通过四川省年最大 1 h 降雨量均值等值线图插值得到^[20](表 1)。

2 研究方法

将沟谷泥石流 1 h 激发雨量 R_s 与年最大 1 h 降雨量均值 R_{60} 之比定义为泥石流雨量敏感系数, 简称敏感系数。影响敏感系数的大小主要是地形、物源和气候条件, 而在和年最大 1 h 降雨量均值 R_{60} 因为地震灾区面积大, 难以获取局地年最大 1 h 降雨量, 本文通过四川省年最大 1 h 降雨量均值等值线图插值得到^[20]。

表 1 中所列泥石流沟的特征指数中, 每一单独因子不能完全反映所有的影响因子。由于因子之间的相关性, 将所有的特征指数全部用于泥石流雨量敏感系数的计算存在重叠效应。例如沟岸坡度和岩石类型、土地利用类型都对松散物源的储量有影响, 不同坚硬程度的岩石对应不同沟谷地形等。利用主成分分析方法, 将各泥石流沟的特征指数进行主成分分析, 构建相互独立的因子既可以避免计算因子之间重复, 又可以最大限度的统计所有的影响因子。得到主成分之后, 再对泥石流激发雨量敏感系数进行拟合, 从而可求出沟谷泥石流灾害的 1 h 激发雨量 R_s 。

2.1 主成分分析

不同指标的取值标准不一致, 进行主成分分析之前首先对原始数据进行无量纲化处理。标准化处理公式如下:

$$z_{ij} = \frac{(a_{ij} - \bar{a}_j)}{\sigma_j} \quad (1)$$

式中 a_{ij} 是第 i 个泥石流沟的第 j 个影响因子, 其中 $i = 1 \sim 30, j = 1 \sim 8$; \bar{a}_j 是所有泥石流沟第 j 个影响因子的平均值; σ_j 是所有泥石流沟第 j 个影响因子的标准差。标准化后数据形式如下:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & \cdots & Z_{1,8} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{24,1} & \cdots & Z_{24,8} \end{pmatrix} \quad (2)$$

各因子之间的相关系数, 计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{30} (z_{ki} - \bar{z}_i)(z_{kj} - \bar{z}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{30} (z_{ki} - \bar{z}_i)^2 \sum_{k=1}^{30} (z_{kj} - \bar{z}_j)^2}} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为第 i 个因子和第 j 个因子的相关系数; z_{ki} 为第 k 条泥石流沟的第 i 个因子; \bar{z}_i 为所有泥石流沟第 i 个因子的平均值; z_{kj} 为第 k 条泥石流沟的第 j 个因子; \bar{z}_j 为所有泥石流沟第 j 个因子的平均值。计算结果如下:

$$R = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.947 & -0.562 & -0.307 & -0.397 & 0.053 & -0.005 & 0.273 \\ 0.947 & 1.000 & -0.585 & -0.222 & -0.418 & 0.181 & -0.060 & 0.239 \\ -0.562 & -0.585 & 1.000 & -0.109 & 0.284 & -0.205 & 0.344 & 0.118 \\ -0.307 & -0.222 & -0.109 & 1.000 & -0.392 & 0.190 & -0.522 & 0.003 \\ -0.397 & -0.418 & 0.284 & -0.392 & 1.000 & -0.293 & 0.348 & -0.214 \\ 0.053 & 0.181 & -0.205 & 0.190 & -0.293 & 1.000 & 0.144 & 0.216 \\ -0.005 & -0.060 & 0.344 & -0.522 & 0.348 & 0.144 & 1.000 & -0.032 \\ 0.273 & 0.239 & 0.118 & 0.003 & -0.214 & 0.216 & -0.032 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (4)$$

建立特征方程

$$Rx = \lambda x, \quad (5)$$

求解该方程得到特征值 ($\lambda_1 = 2.847\ 2, \lambda_2 = 1.862\ 9, \lambda_3 = 1.262\ 6, \lambda_4 = 0.955\ 3, \lambda_5 = 0.031\ 2, \lambda_6 = 0.560\ 1, \lambda_7 = 0.191\ 3, \lambda_8 = 0.289\ 5$) 和对应特征向量并由此得到以及每一特征值对应主成分的贡献率。

$$L = \begin{pmatrix} -0.521 & -0.296 & 0.100 & -0.126 & 0.744 & 0.093 & -0.147 & 0.170 \\ -0.538 & -0.235 & 0.066 & -0.023 & -0.613 & 0.047 & -0.510 & 0.102 \\ 0.431 & -0.082 & -0.362 & -0.359 & 0.121 & 0.418 & -0.581 & -0.137 \\ -0.024 & 0.670 & -0.084 & 0.052 & 0.062 & 0.021 & -0.229 & 0.695 \\ 0.389 & -0.323 & 0.186 & 0.071 & 0.093 & -0.708 & -0.371 & 0.233 \\ -0.189 & 0.111 & -0.590 & 0.622 & 0.151 & -0.214 & -0.221 & -0.312 \\ 0.168 & -0.531 & -0.328 & 0.332 & -0.102 & 0.306 & 0.270 & 0.541 \\ -0.189 & -0.039 & -0.596 & -0.590 & -0.090 & -0.413 & 0.258 & 0.109 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由表 2 可知第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6 主成分累计贡献率高达 97.22%, 故只需求出第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6 主成分即可。分别利用特征值 $\lambda_1 = 2.847\ 2, \lambda_2 = 1.862\ 9, \lambda_3 = 1.262\ 6, \lambda_4 = 0.955\ 3, \lambda_6 = 0.560\ 1, \lambda_8 = 0.289\ 5$ 对应的特征向量构建主成分。

$$\begin{cases} M_1 = 1_{11}a_1 + 1_{12}a_2 + 1_{13}a_3 + 1_{14}a_4 + 1_{15}a_5 + 1_{16}a_6 + 1_{17}a_7 + 1_{18}a_8 \\ M_2 = 1_{21}a_1 + 1_{22}a_2 + 1_{23}a_3 + 1_{24}a_4 + 1_{25}a_5 + 1_{26}a_6 + 1_{27}a_7 + 1_{28}a_8 \\ M_3 = 1_{31}a_1 + 1_{32}a_2 + 1_{33}a_3 + 1_{34}a_4 + 1_{35}a_5 + 1_{36}a_6 + 1_{37}a_7 + 1_{38}a_8 \\ M_4 = 1_{41}a_1 + 1_{42}a_2 + 1_{43}a_3 + 1_{44}a_4 + 1_{45}a_5 + 1_{46}a_6 + 1_{47}a_7 + 1_{48}a_8 \\ M_5 = 1_{81}a_1 + 1_{82}a_2 + 1_{83}a_3 + 1_{84}a_4 + 1_{85}a_5 + 1_{86}a_6 + 1_{87}a_7 + 1_{88}a_8 \\ M_6 = 1_{81}a_1 + 1_{82}a_2 + 1_{83}a_3 + 1_{84}a_4 + 1_{85}a_5 + 1_{86}a_6 + 1_{87}a_7 + 1_{88}a_8 \end{cases} \quad (7)$$

表 2 特征值及主成分贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
M_1	2.847 2	35.59	35.59
M_2	1.862 9	23.28	58.88
M_3	1.262 6	15.78	74.66
M_4	0.955 3	11.94	86.60
M_5	0.560 1	7.00	93.60
M_6	0.289 5	3.62	97.22
M_7	0.191 3	2.39	99.61
M_8	0.031 2	0.39	100.00

其中 1_{ij} 是第 i 个特征值对应特征向量的第 j 个元素, a_i 是泥石流沟的第 i 个特征指数。

由式(4) 计算得到各泥石流沟特征指数的主成分如表 3 所示:

表 3 各泥石流沟特征指数的主成分

沟名	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
牛眠沟	1.03	-38.40	-57.26	16.56	121.40	-123.29
双养子沟	32.94	-42.25	-2.39	2.25	2.94	-7.46
烂泥沟	29.02	-32.70	6.59	7.45	8.17	-14.34
红椿沟	7.07	-29.67	-23.66	4.72	38.79	-43.64
干沟	12.24	-54.88	13.99	6.05	-4.31	-11.72
魏家沟	-9.07	-27.05	-79.30	16.72	139.45	-138.92
苏宝河	-22.96	-61.24	31.17	11.35	-13.49	-18.97
走马岭	-8.30	-35.72	-90.25	20.01	174.18	-171.40
孙家沟	34.12	-46.06	-17.11	6.60	31.95	-34.79
大沟	10.24	-36.74	-61.07	14.94	112.59	-112.16
蔡家沟	34.64	-36.48	-0.84	2.84	10.18	-13.44
滴洞沟	35.60	-35.99	0.20	2.92	7.57	-11.23
簸箕沟	34.97	-35.60	1.55	2.47	5.55	-9.35
八一沟	18.82	-47.87	-29.56	7.47	53.46	-57.50
大水沟/唐家山	11.90	-30.68	-41.96	11.05	78.66	-80.24
唐房沟	-15.86	-31.90	-111.72	19.55	205.82	-200.19
肖家沟	13.08	-39.62	-28.85	5.81	50.69	-54.84
彻底关	26.17	-48.03	7.40	2.38	-0.38	-9.25

2.2 泥石流 1 h 激发雨量计算方法

通过主成分分析方法得到了上文 18 个案例中影响泥石流活跃性的主成分指数。利用多元线性回归方法拟合得到泥石流激发雨量折减系数。

$$C = 2.021 - 0.2069M_1 - 0.2445M_2 - 0.0059M_3 + 0.3532M_4 + 0.707M_5 + 0.8214M_6, \quad (8)$$

并且拟合效果较好, $R^2 = 0.85$ 。则沟谷泥石流 1 h 激发雨量计算公式为:

$$R_s = R_{60}(2.021 - 0.2069M_1 - 0.2445M_2 - 0.0059M_3 + 0.3532M_4 + 0.707M_5 + 0.8214M_6)。 \quad (9)$$

式中: R_s 是沟谷泥石流的激发雨量; R_{60} 为沟谷所在地区年最大 1 h 降雨量均值。

2.3 汶川灾区泥石流 1 h 激发雨量

上文中所得到的泥石流 1 h 激发雨量计算方法是根据汶川地震灾区已发的 18 个泥石流案例的特征指数经过主成分分析后拟合得到的, 拟合结果具有一定的可靠性。少数泥石流激发雨量计算值和泥石流实际激发雨量之间的误差超过 40%。主要原因可能为本文所搜集的泥石流案例的实际激发雨量主要来自雨量观测站的数据, 而偏远山区雨量观测站密度较小, 所测资料并不能准确反映各个地区的实际降雨情况; 另外, 本文所选的泥石流案例包含了清平“8·13”群发性泥石流中的蔺家沟、蔡家沟等 9 条沟, 泥石流激发雨量全部采用同一个雨量站的最大小时雨强缺乏准确性。少数误差较大以外, 大部分在可接受的范围内, 该方法具有一定的可靠性。

假设各泥石流沟的特征指数取值是随机变量,

文中选取案例的特征指数与整个灾区的潜在泥石流沟的特征指数是同分布的。若将整个汶川地震灾区泥石流隐患点作为一个总体, 所选取案例作为总体的样本。根据样本的期望、标准差与总体的期望、标准差相等。则以上方法可用于整个地震灾区泥石流沟 1 h 激发雨量的计算。

2.4 计算方法验证

汶川地震发生后, 2012 年 8 月 18 日凌晨, 宝兴县穆坪镇冷木沟爆发泥石流, 给宝兴县造成严重的损失^[22]。冷木沟流域面积 9.44 km², 主沟长 3.98 km, 沟床比降 31.4%, 沟岸坡度 45°~50°。流域植被覆盖较好, 松散物质主要源于地震引起的滑坡崩塌体。2013 年 4 月 20 日, 雅安芦山地震发生后, 冷木沟流域新增松散物源约 70 余万 m³, 总物源量约 350 万 m³, 出露岩层主要是灰岩、白云岩以及碳酸岩。通过本文提出的方法计算得到雨量敏感系数为 1.218 3, 根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》得到冷木沟年最大 1 h 暴雨量均值为 28.74 mm, 则冷木沟泥石流的 1 h 激发雨量为 35.01 mm。2013 年 5 月 23 日下午 16:10, 宝兴县遭遇局地强降雨, 17:10 左右冷木沟发生泥石流, 18:05 降雨结束^[23]。在 23 日下午 16 时到 18 时之间, 县城最高降雨量出现在冷木沟顶 57.5 mm, 沟口降雨量 27.9 mm、沟中降雨量 47.2 mm, 教场沟沟口降雨量 35.3 mm、沟顶 38.4 mm^[24]。由此可见, 本模型作为泥石流临界激发雨量的确定具有一定的可靠性。

3 结论与讨论

本文定义了沟谷泥石流激发雨量敏感系数 C 。对汶川地震灾区 18 个沟谷影响泥石流路活跃性的特征参数进行主成分分析, 选取了 7 个相互独立的影响因子。通过拟合方法得到了沟谷泥石流小时雨量激发系数的计算方法, 从而得到地震灾区泥石流隐患点泥石流灾害的 1 h 激发雨量计算方法。本文提出的模型计算得到泥石流激发雨量可对泥石流的预警预报提供参考, 但是在泥石流频繁爆发的山区, 局地降雨差别较大, 例如冷木沟在一次降雨过程中, 不同位置之间降雨量就存在显著地差别。所以本模型的应用还依赖于精准的气象预报和监测系统。

泥石流活跃性的影响因素较多, 地区差异较大^[25]。比如不同地区的气候差异、地貌特征差异等。以上方法是在 18 个泥石流灾害点数据基础上得到的, 对汶川地震灾区具有一定的代表性。芦山地震和汶川地震的主控断裂带同属龙门山断裂带, 同时在气候类型, 地形特征上也具有很大的相似性, 地理位置上也比较接近。该方法对于芦山地震后的泥石流激发雨量的确定也具有一定的

适用性。另外, 泥石流爆发需要严格的条件, 降雨作为泥石流灾害的触发条件主要表现在前期有效累计雨量和激发雨量, 本文仅考虑了 1 h 激发雨量。

参考文献:

- [1] Caine N. The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows[J]. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 1980, 62(1/2): 23–27.
- [2] Chen C Y, Chen T C, Yu F C, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(5): 715–724.
- [3] Cannon S h, S L Reneau. Conditions for generation of fire-related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico[J]. *Earth surface processes and landforms*, 2000, 25(10): 1103–1121.
- [4] Cannon S h, Kirkham R M, Parise M. Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado[J]. *Geomorphology*, 2001, 39(3): 171–188.
- [5] Cannon S h, Gartner J E, Wilson R C, et al. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3): 250–269.
- [6] Matthews A J, Barclay J, Carn S, et al. Rainfall-induced volcanic activity on Montserrat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(13): 221–224.
- [7] Barclay J, Alexander J, Sušnik J. Rainfall-induced lahars in the Belham valley, Montserrat, West Indies[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(4): 815–827.
- [8] Huang C C. Critical rainfall for typhoon-induced debris flows in the Western Foothills, Taiwan[J]. *Geomorphology*, 2013, 185(1): 87–95.
- [9] 谭万沛, 韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. *灾害学*, 1992, 7(2): 37–42.
- [10] Chen N, C Yang, W Zhou, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(4): 362–372.
- [11] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. *山地学报*, 2011, 28(3): 341–349.
- [12] 谢洪, 钟敦伦, 矫震. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 501–509.
- [13] 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.
- [14] 胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 物源条件对震后泥石流发展影响的初步分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(1): 1–6.
- [15] Koi T, hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 692–702.
- [16] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1): 49–61.
- [17] Tang C, Zhu J, Li W, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187–194.
- [18] Ma C, Hu K, Tian M. Comparison of debris-flow volume and activity under different formation conditions[J]. *Natural hazards*, 2013, 67(2): 261–273.
- [19] 四川省华地建设工程有限公司. 四川省绵竹市清平乡“8·13”特大泥石流灾后恢复重建地质灾害危险性评估[R]. 成都: 四川省华地建设工程有限公司, 2010.
- [20] 沈跃明. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[R]. 成都: 四川省水利电力厅, 1984.
- [21] 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [22] 铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短历时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析—以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. *灾害学*, 2013, 28(4): 110–113.
- [23] 曹修定, 王洪磊, 王晨辉. 宝兴县泥石流监测预报预警系统稳过“初考”[EB/OL] (2013–5–27) [2013–06–01]. <http://www.cgs.gov.cn/cgjs/sgh/ywdongtai/21386.htm>.
- [24] 雅安市国土资源局. 宝兴县县城成功避险转移群众 500 余人[EB/OL] (2013–05–25) [2013–06–01]. <http://www.yasgtzy.gov.cn/html/ShowArticle.sap?ArticleID=5427>.
- [25] 马超, 胡凯衡, 赵晋恒, 等. 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[J]. *灾害学*, 2013, 28(4): 89–94.

Excitation Rainfall of Debris Flows in the Stricken Area of Wenchuan Earthquake

Lei Fahong^{1, 2, 3}, Hu Kaiheng^{1, 2}, Hu Yunhua^{2, 3} and Ma Chao^{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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is high relationship between rainfall intensity and trend of debris flow occurrence, so rainfall intensity is usually used for debris flow warning. By using Matlab principle component analysis on driving factors of debris flows are carried out based on 18 debris flows events, which contain watershed area, channel length, volume of loosely material, rock types, soil types, seismic intensity. Finally, 6 principle components are selected to generate a multiple liner regression model of the critical rainfall of debris flows. Feasibility of the model is discussed. It can provide reference for warning of debris flow in the stricken area.

Key words: earthquake stricken area; debris flow; critical rainfall; Wenchuan earthquake