

四川省典型区域滑坡、泥石流致灾 临界雨量阈值确定方法

刘海知¹, 马振峰², 范广洲³

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 四川省气候中心, 四川 成都 610072;
3. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要: [目的] 确定四川省滑坡泥石流典型区域各个子区最关键的降雨因子, 建立典型区域各子区临界阈值模型, 为该区对滑坡、泥石流灾害进行有效预报提供科学依据。[方法] 利用 1999—2014 年四川滑坡泥石流灾情资料, 确定出滑坡、泥石流的典型区域, 根据典型区域各个子区的气候和下垫面条件, 比较不同降雨因子组合的阈值模型, 得到各子区最关键的降雨因子, 建立典型区域各子区临界阈值模型。[结果] 平均降雨强度和峰值降雨强度是典型区域滑坡、泥石流阈值模型中的重要指标; 诱发雨量多作为滑坡典型区域致灾临界阈值模型雨量指标, 激发雨量只作为泥石流典型区域致灾临界阈值模型雨量指标; 有效雨量可以在滑坡、泥石流典型区域值模型中应用。典型区域多采用多因子预报模型, 只有汶川震区采用单因子预报模型, 其临界阈值在震后呈现上升趋势。[结论] 不同降雨参数对诱发滑坡泥石流灾害的作用不同, 典型区域中各子区建立的预报模型及得出的临界阈值也不同。多因子预报模型考虑了多种降雨参数, 比单因子模型更客观。

关键词: 滑坡; 泥石流; 典型区域; 降雨参数; 阈值模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)04-0126-06

中图分类号: X34, P64

文献参数: 刘海知, 马振峰, 范广洲. 四川省典型区域滑坡、泥石流致灾临界雨量阈值确定方法[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):126-131. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.021; Liu Haizhi, Ma Zhenfeng, Fan Guangzhou. Methods of determining rainfall thresholds of landslides and debris flows in typical region in Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4):126-131. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.021

Methods of Determining Rainfall Thresholds of Landslides and Debris Flows in Typical Region in Sichuan Province

LIU Haizhi¹, MA Zhenfeng², FAN Guangzhou³

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China; 2. Sichuan Climat Center, Chengdu, Sichuan 610072, China;
3. Atmospheric Sciences College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: [Objective] We chose the most significant rainfall indicators of landslides and debris flows in typical regions and built a critical threshold model for each sub-region in typical regions to provide a scientific basis for effective prediction of landslide and debris flows. [Methods] This study collected Sichuan's geological disaster cases occurred in 1999—2014, to define the typical regions of landslides and debris flows in Sichuan Province. We compared the threshold models that are made up of different rainfall indicators in each typical region to construct our rainfall threshold models. [Results] Average rainfall intensity and maximum rainfall intensity are used frequently as significant parameters in threshold models of landslides and debris flows in typical regions. Indirect rainfall is a precipitation indicator of landslides in typical region generally, direct rainfall is a precipitation indicator of debris flows just in typical region generally. Effective rainfall was adopted to the precipitation indicator both of landslides and debris flow threshold models in typical regions.

收稿日期: 2016-09-30

修回日期: 2016-12-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“华西秋雨年际变化规律及其形成机理研究”(41275097); 四川省科技支撑计划项目(15C0098)

第一作者: 刘海知(1991—), 男(汉族), 四川省荣县人, 硕士, 研究方向为强降水诱发地质灾害。E-mail: lhz1012@aliyun.com.

通讯作者: 马振峰(1961—), 男(汉族), 内蒙古自治区四子王旗人, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事气候预测, 气候变化及生态环境研究。E-mail: Mzf616@aliyun.com.

Model with double factors were applied to most of typical regions of landslides and debris flows. Model with one factor was just applied to Wenchuan earthquake-stricken area, the critical threshold gradually raised from Wenchuan earthquake. [Conclusion] Different rainfall factor has different effect on disasters, each typical region has its own optimum rainfall threshold model. Model with double factors is more objective than those with just one factor, as they contain more rainfall factors.

Keywords: landslides; debris flows; typical regions; rainfall parameters; threshold modes

地处中国西南的四川地区,位于地貌第一阶梯向第二阶梯的过度带上,南北大断裂带的鲜水河断裂(龙门山断裂)—安宁河断裂—小江断裂—红河断裂纵观其间,巨大的地形起伏,复杂的地质构造,加上西南季风影响形成的独特气候,导致四川地区历来是中国滑坡、泥石流的高发区。地质灾害威胁着山区的交通干线、农田水利等基础设施安全,成(都)昆(明)铁路沿线就分布着 3 005 条泥石流沟,占全国铁路沿线的 30%,为全国之最。目前,对滑坡、泥石流灾害进行有效预报是当务之急,其中减少危害是目的,灾害监测是手段,确定致灾临界雨量阈值是关键,但由于未能清楚地了解诱发灾害的降雨特征,当前效果并不理想。关于滑坡、石流致灾临界雨量阈值的确定,目前主要有两种方法:其一是统计法,利用以往灾情样本的降雨资料进行统计分析,选择降雨参数建立经验关系^[1-10];其二是动力方法,基于灾害形成机理建立物理模型,计算致灾降雨条件,但灾害形成机理相对复杂,驱动动力模型所需的气象、水文、地质等各种资料收集比较困难,该方法一般用于小范围流域单沟、单坡的临界雨量计算,就现阶段而言,前者在世界范围内应用更为广泛。多数灾害易发区的资料短缺,一般在少量灾情事件的基础上单一采用降雨强度与降雨历时的关系建模或者通过最小雨强、最小雨量来确定致灾临界阈值^[8-11],这样的方法存在一定局限性:一方面,灾害启动方式多样,单一降雨指标或模型往往有其应用局限性。另一方面,灾害降雨条件与灾害降雨临界阈值非同一概念,部分特大灾害事件当时的降雨条件,并不能作为其致灾临界阈值^[9],选择合适的预报模型,所以研究典型区域滑坡、泥石流的降雨特征,确定其阈值有重要意义。

1 资料

从降雨的角度以统计方法来确定典型区域灾害的降雨阈值,灾情样本及其对应降雨资料的质和量对统计结果影响很大^[2],因此确保所选样本的客观性和代表性至关重要。汶川地震大幅度降低了四川灾区降雨诱发灾害的临界阈值^[7],因此在确定致灾临界雨量阈值时主要利用震后的灾情样本及其对应降雨资料,而在确定滑坡、泥石流的典型区域时则利用近

15 a 的灾情样本。其中,灾情数据主要由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、四川省国土厅提供,少部分由四川省民政厅和四川省救灾年鉴补充。降水数据主要是灾害发生地气象站逐日、逐时降雨数据,均来自于四川省气候中心,由于灾害点密度远远大于气象站个数,所以剔除了距离气象站较远和雨量信息明显未被当地气象站合理表征的灾情个例。

2 滑坡、泥石流典型区域

四川省滑坡灾害多出现在该省东部,高频区在巴山地区,巴中、达州部分地区年均滑坡发生频次在 4 次以上;泥石流灾害主要发生于四川西部,高频区在川西以北的阿坝地区,阿坝州部分县年均泥石流爆发频次达到 3 次以上。此处将滑坡年均发生频次在 3 次及其以上的广元(市区)、南江县、万源县、仪陇县、宣汉县、达州(市区)、南充(市区)7 个区县作为四川滑坡典型区域,将泥石流年均发生频次在 2 次及其以上的壤塘县、金川县、马尔康县、汶川县、理县、黑水县 6 个县作为四川省泥石流典型区域。

3 典型区域降雨指标和阈值方法

3.1 降雨指标

如果从更小的降雨时间尺度上对致灾临界阈值进行确定,则利用以小时降雨量为基础的各项降雨指标。前期的降雨临界阈值研究中常用的降雨指标主要有:激发雨量 R ,诱发雨量 E ,综合雨量 R_c ,降雨强度 I ,降雨历时 D 等,其中降雨历时 D 又分为激发历时 D_R 和诱发历时 D_E 。各指标定义为:

(1) 激发历时 D_R 。灾害发生前最近的一场连续降雨过程持续时间。

(2) 激发雨量 R 。激发历时过程雨量。

(3) 诱发历时 D_E 。对灾害的发生起到作用的降雨过程持续时间。诱发历时 D_E 的截止时刻为灾害的发生时刻,在灾害发生时间只精确到日的情况下,近似用当日峰值降雨强度时刻作为灾害的发生时刻。针对诱发历时起始时刻的确定存在不同的说法,Bruntti^[12]等曾以灾害发生前连续 2 d 或 4 d 无雨后的首次降雨作为诱发历时 D_E 的起始时刻。诱发历

时 D_E 代表对灾害发生有作用的降雨时段,根据有效降雨量可以反映不同时段降雨对灾害的影响,一般将有效降雨量作为反映降雨致灾作用程度的指标,通过比较不同时段有效降雨量来确定 D_E 的开始时刻。在 D_E 开始时刻之前的降雨过程对致灾起到的作用应相对较小,即其有效降雨量应相对较小^[13]。定义小时降雨量均大于 0.1 mm 的一个连续时段为一次降雨过程,选取灾害发生前足够长时间内的历次降雨过程,按公式(1)计算每次降雨过程的有效降雨量 R_i , R_i 和 n_i 分别为该降雨过程中第 i 小时的降雨量及其距灾害发生时刻的时间长度, n_i 的单位为天且可为小数。 α ($0 < \alpha < 1$) 是有效降水系数,表示岩土体对雨水滞留能力的大小,它由区域内岩土体总体性质决定^[14]。由于滑坡、泥石流灾害典型区域地形地貌条件复杂,有效降水量对典型区域各子区地质灾害的影响程度不完全一致^[15],需要分别确定其最佳有效降水系数, σ 为该地区有效降雨量标准差,如公式(2)。在灾害发生前一定时间范围内找到某一时刻 t ,若 t 之前的历次降雨过程的有效降雨量之和小于 t 时刻至 D_E 结束时刻之间的历次降雨过程有效降雨量之和的 20%,则以 t 时刻作为 D_E 的起始时刻。在有效雨量与灾害发生相关性分析中,通过比较不同日数有效降雨量与灾害频次的相关性来确定对灾害发

生有作用的前期降雨日数范围,结果是:典型区域滑坡与前 15 d 有效雨量相关性最大,多属于长日数降水诱发型;典型区域泥石流与前 3 d 有效雨量相关性最大,多属于较短日数降水诱发型。所以此处将滑坡发生前的有效降水最大时间范围定为 15 d,泥石流发生前有效降水最大时间范围定为 3 d,在此范围内以上述方法确定灾害诱发历时 D_E 的起始时刻 t 。

(4) 诱发雨量 E 。诱发历时过程雨量。

(5) 前期雨量 P 。在最大范围的起始时刻至诱发历时的起始时刻 t 的历次降雨过程有效雨量之和。

(6) 综合雨量 R_{cp} 。前期雨量与诱发雨量之和。

(7) 平均雨强 I_{ave} 。诱发历时 D_E 过程中的平均降雨强度。

(8) 峰值雨强 I_{max} 。诱发历时 D_E 过程中的最大降雨强度。

$$R_c = \sum_{i=1}^n \alpha R_i \quad (1)$$

$$\alpha = \min\left(\frac{\sigma}{\max R_c}\right) \quad (2)$$

3.2 不同降雨指标对滑坡、泥石流发生的作用

各种降雨指标都可能对灾害的发生产生作用,有必要对典型区域各个降雨指标的作用进行分析。将典型区域滑坡、泥石流各降雨指标以 2 个节点分为 3 个区间。各降雨指标每个区间所占比例如图 1 所示。

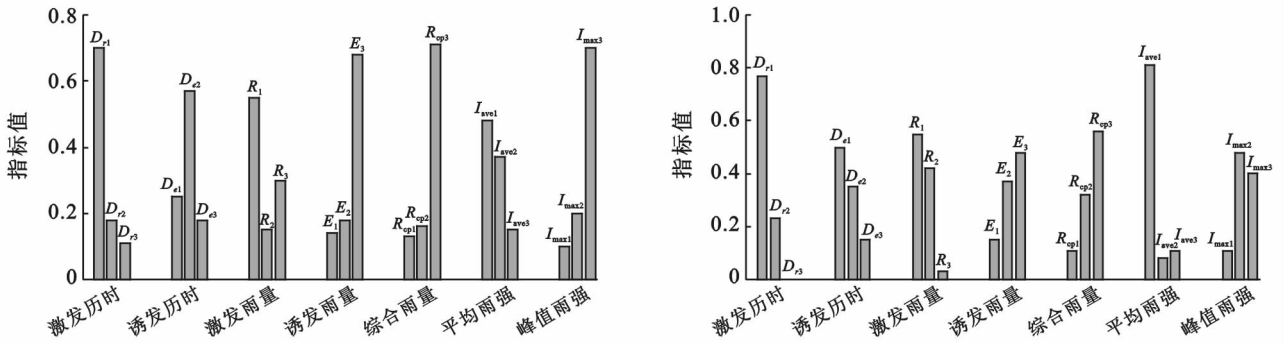


图 1 滑坡、泥石流降雨指标

典型区域滑坡各降雨指标划分为:

激发历时 D_R 分为: D_{R1} , D_{R2} 及 D_{R3} 。 $D_{R1} \leq 6$ h, 6 h $< D_{R2} \leq 12$ h, $D_{R3} > 12$ h。

诱发历时 D_E 分为: D_{E1} , D_{E2} 及 D_{E3} 。 $D_{E1} \leq 24$ h, 24 h $< D_{E2} \leq 48$ h, $D_{E3} > 48$ h。

激发雨量 R 分为: R_1 , R_2 及 R_3 。 $R_1 \leq 10$ mm, 10 mm $< R_2 \leq 25$ mm, $R_3 > 25$ mm。

诱发雨量 E 分为: E_1 , E_2 及 E_3 。 $E_1 \leq 50$ mm, 50 mm $< E_2 \leq 100$ mm, $E_3 > 100$ mm。

综合雨量 R_{cp} 分为: R_{cp1} , R_{cp2} 及 R_{cp3} 。 $R_{cp1} \leq 50$ mm, 50 mm $< R_{cp2} \leq 100$ mm, $R_{cp3} > 100$ mm。

平均雨强分为 I_{ave} 分为: I_{ave1} , I_{ave2} 及 I_{ave3} 。 $I_{ave1} \leq 4$ mm/h, 4 mm/h $< I_{ave2} \leq 8$ mm/h, $I_{ave3} > 8$ mm/h。

峰值雨强分为 I_{max} 分为: I_{max1} , I_{max2} 及 I_{max3} 。 $I_{max1} \leq 8$ mm/h, 8 mm/h $< I_{max2} \leq 16$ mm/h, $I_{max3} > 16$ mm/h。

泥石流典型区域集中在高原地区,各降雨指标每个区间所占比例如图 1 所示。降雨指标区间划分不同于滑坡典型区域划分为:

激发历时 D_R 分为: D_{R1} , D_{R2} 及 D_{R3} 。 $D_{R1} \leq 6$ h, 6 h $< D_{R2} \leq 12$ h, $D_{R3} > 12$ h。

诱发历时 D_E 分为: D_{E1} , D_{E2} 及 D_{E3} 。 $D_{E1} \leq 12$ h, 12 h $< D_{E2} \leq 24$ h, $D_{E3} \geq 24$ h。

激发雨量 R 分为: R_1, R_2 及 R_3 。 $R_1 \leq 10$ mm, $10 \text{ mm} < R_2 \leq 25$ mm, $R_3 > 25$ mm。

诱发雨量 E 分为: E_1, E_2 及 E_3 。 $E_1 \leq 10$ mm, $10 \text{ mm} < E_2 \leq 25$ mm, $E_3 > 25$ mm。

综合雨量 R_{cp} 分为: R_{cp1}, R_{cp2} 及 R_{cp3} 。 $R_{cp1} \leq 10$ mm, $10 \text{ mm} < R_{cp2} \leq 25$ mm, $R_{cp3} > 25$ mm。

平均雨强分为 I_{ave} 分为: I_{ave1}, I_{ave2} 及 I_{ave3} 。 $I_{ave1} \leq 4$ mm/h, $4 \text{ mm/h} < I_{ave2} \leq 8$ mm/h, $I_{ave3} > 8$ mm/h。

峰值雨强分为 I_{max} 分为: I_{max1}, I_{max2} 及 I_{max3} 。 $I_{max1} \leq 8$ mm/h, $8 \text{ mm/h} < I_{max2} \leq 16$ mm/h, $I_{max3} > 16$ mm/h。

如两类灾害的各降雨指标量值分布区间所示: 绝大部分降雨指标数值区间所占比例不均, 存在明显优势区间, 表明该类降雨因子对致灾的作用更为直接。而分布更为平均的因子如: 典型区域滑坡的激发雨量和平均雨强, 典型区域泥石流的诱发历时和诱发雨量并不是致灾最直接的因子, 因此不同降雨指标对诱发滑坡、泥石流灾害的作用不同, 典型区域中各子区建立的预报模型及得出的临界阈值也不同, 有必要对典型区域各个子区降雨指标进行分析、比较。

3.3 模型选取与结果检验

目前, 一些阈值模型已得到了普遍应用及验证^[1-11], 但四川滑坡、泥石流典型区域幅员辽阔, 物源充沛, 各地气候、下垫面条件的差异导致单一的致灾临界雨量阈值模型不能代表每个子区的真实阈值, 有必要对典型区域各个子区降雨指标进行分析、比较, 确定不同子区的最重要的降雨参数, 进而建立各个子区预报模型; 如 $I-D, R-D, E-D, R_{cp}-D, I-E$ 和 $I-R_{cp}$ 等模型, 在 $I-D$ 模型中, 表示降雨诱发历时 D_E 内的平均降雨强度, 即平均雨强—诱发历时 ($I_{ave}-D_E$) 阈值模型, 而在 $I-E$ 和 $I-R_{cp}$ 模型中; I 表示激发(峰值)降雨强度, 即峰值雨强—诱发雨量 ($I_{max}-E$) 和峰值雨强—有效雨量 ($I_{max}-R_{cp}$) 阈值模型; 而在 $R-D$ 模型中, R 表示激发雨量, D 则为激发历时 D_R 。本研究分别以滑坡典型区域中的广元(市区)和泥石流典型区域中的理县为例, 比较上述降雨指标组合的几种阈值模型预报精度, 准确率最高的模型作为最终采用的阈值模型, 典型区域其余子域按照相同方法得出结果。典型区域各个子区的灾情样本均来发生于震后(2008—2014年), 如图 2 所示, 分别为上述几种致灾临界雨量阈值模型在广元(市区)的应用, 图 3 分别为上述几种致灾临界雨量阈值模型在理县的应用。存在降雨历时作为阈值指标的模型图采用双对数坐标系, 其余采用普通直角坐标系。图中

直线为降雨指标阈值线, 阈值图中分别给出了灾害样本的降雨场次和未发生灾害的降雨场次, 其中未发生灾害的降雨场次均选自于该区域 2014 年夏季(6—8月)中未发生灾害的降雨时刻。图 2 中广元(市区)各个降雨指标阈值模型中, $I_{ave}-D_E$ 阈值模型中阈值线上方包含了 77% 的滑坡事件(44/57), 有 13 次漏报情况, 有 1 次空报情况, 预报精度为 75%, 和 $I_{max}-R_{cp}$ 阈值模型中阈值线涵盖了 72% 的滑坡事件(41/57), 无空报降雨场次, 预报精度为 72%, $E-D_E$ 阈值模型中阈值线上方包含了 72% 的滑坡事件(41/57), 有 16 次漏报情况, 有 4 次空报情况, 预报精度为 67%。剩余模型预报精度则相对更低, 所以对于广元(市区)的滑坡致灾临界阈值模型应采用 $I_{ave}-D_E$ 模型, 数学关系式为: $I_{ave} \geq 18.06 D_E^{-0.5542}$ 。同理, 四川滑坡典型区域中其他子区域的致灾临界雨量阈值模型也通过比较各个阈值模型预报精确度来确定, 其结果和表达式详见表 1。达州(市区)和宣汉采用了 $I_{max}-E$ 阈值模型, 南充(市区)采用了 $I_{max}-R_{cp}$ 阈值模型, 南江和万源采用了 $R_{cp}-D_E$ 阈值模型, 仪陇采用了 $R_{cp}-D_E$ 阈值模型。

表 1 滑坡典型区域降雨模型与临界雨量阈值

典型区域	阈值	条件
达州(市区)	$I_{max} \geq 20.2 - 0.053E$	$E \geq 19.3, I_{max} \geq 15.8$
广元(市区)	$I_{ave} \geq 18.06 D_E^{-0.5524}$	$5 \leq D_E \leq 67$
南充(市区)	$I_{max} \geq 25.35 - 0.114 R_{cp}$	$R_{cp} \geq 48.6, I_{max} \geq 11.2$
南江	$R_{cp} \geq 72.47 D_E^{0.072}$	$3 \leq D_E \leq 87$
万源	$R_{cp} \geq 3.93 D_E^{1.003}$	$8 \leq D_E \leq 75$
宣汉	$I_{max} \geq 39.9 - 0.096E$	$E \geq 78.1, I_{max} \geq 21$
仪陇	$E \geq 66.2 D_E^{0.09}$	$4 \leq D_E \leq 86$

图 3 为理县各个降雨指标模型, $I_{ave}-D_E$ 关系中阈值线上方涵盖了 91% 的泥石流事件(10/11), 有 1 次漏报情况, 有 7 次未发生泥石流的降雨场次出现在阈值线上方, 即有 7 次空报情况, 预报精度为 56%, $E-D_E, I_{max}-E$ 和 $I_{max}-R_{cp}$ 关系来进行预报亦可涵盖 82% 的泥石流事件, 而空报次数分别为 7 次, 8 次, 7 次, 三类阈值模型精度分别是 50%, 44%, 50% 剩余模型预报精度则相对更低, 所以对于理县的泥石流致灾临界阈值模型应采用 $I_{ave}-D_E$ 模型, 数学关系式为: $I_{ave} \geq 6.85 D_E^{-0.62}$ 。同理, 四川泥石流典型区域中其他子区域的致灾临界雨量阈值模型也通过比较各个模型预报精确度来确定, 其结果和表达式详见表 2。黑水和壤塘采用了 $R-D_R$ 阈值模型, 金川和马尔康分别采用了 $R_{cp}-D_E$ 阈值模型和 $I_{max}-E$ 阈值模型, 汶川使用单因子 I_{max} 的预报精度最高, 采用的是单因子预报模型。

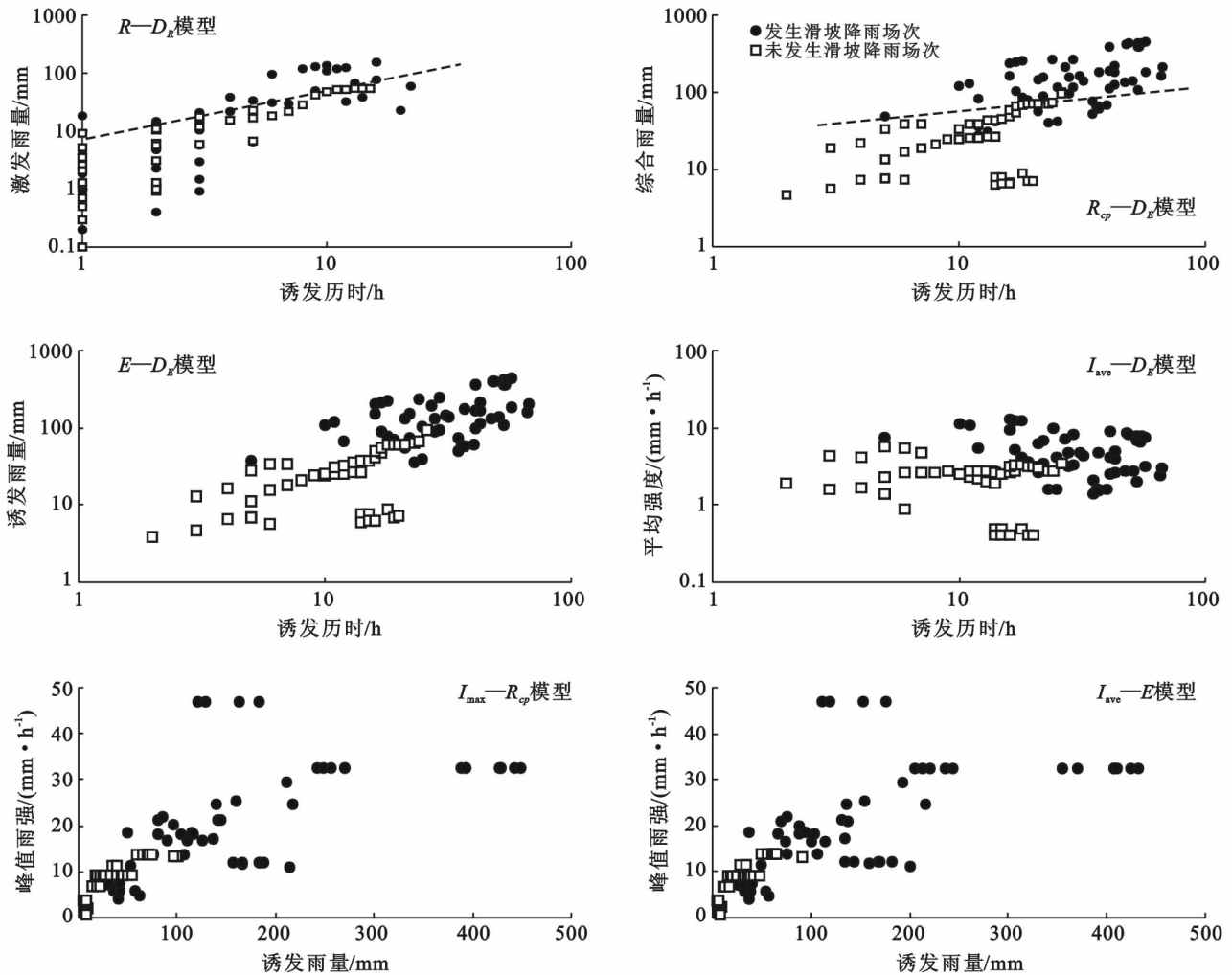


图 2 广元(市区)各降雨指标阈值模型

表 2 泥石流典型区域降雨模型与临界雨量阈值

典型区域	阈值	条件
黑水	$R \geq 3.9 D_R^{0.60}$	$1 \leq D_R \leq 8$
金川	$R_{cp} \geq 3.38 D_E^{0.84}$	$3 \leq D_E \leq 28$
理县	$I_{ave} \geq 6.85 D_E^{-0.63}$	$2 \leq D_E \leq 21$
马尔康	$I_{max} \geq 8.05 - 0.044 E$	$E \geq 14.9, I_{max} \geq 7.4$
壤塘	$R \geq 3.1 D_R^{0.66}$	$1 \leq D_R \leq 8$
汶川	$I_{max} \geq 5.8$	无

通过比较典型区域的致灾临界雨量阈值结果发现,绝大多数地区适合用多因子预报模型,多因子预报模型考虑了多种降雨参数,理论上比单因子预报模型更加客观可靠。就降雨强度而言,平均雨强和峰值雨强在滑坡、泥石流灾害的阈值模型中使用较多,属于两类灾害阈值模型较为重要的指标;对降雨历时来说,诱发历时是典型区域滑坡致灾临界阈值模型中的一个高频指标,而激发历时则只作为典型区域泥石流临界雨量阈值模型指标,说明灾前临近降雨对典型区域泥石流发生的贡献相对于滑坡更明显,而临近降雨

不是典型区域滑坡发生的最主要因素,符合典型区域滑坡长时间、多场次降雨诱发的特点;在雨量指标中,激发雨量只用于了典型区域泥石流致灾临界雨量模型中,与激发历时对应;有效雨量在两类灾害的阈值模型中都有应用,即前期雨量对两类灾害的发生都有一定作用。

3.4 地震灾区临界阈值变化趋势

所有典型区域中只有汶川采用了单因子阈值模型,即将峰雨强作为预报指标。就实用性和操作性而言,单因子模型优于多因子模型,在样本资料有限的情况下亦可分析区域内临界阈值的逐年变化,震后汶川下垫物源状态不断变化,临界阈值不断调整。通过图 4 可以看出,2008—2012 年汶川临界阈值变化呈现逐渐升高的状态,究其原因:一方面因为下垫面沟道物质的粗化和松散物质的流失,物质起动需要的临界径流条件有所提高,另一方面由于植被的恢复导致土壤入渗率增高,同等降雨条件下,地表径流量减小。

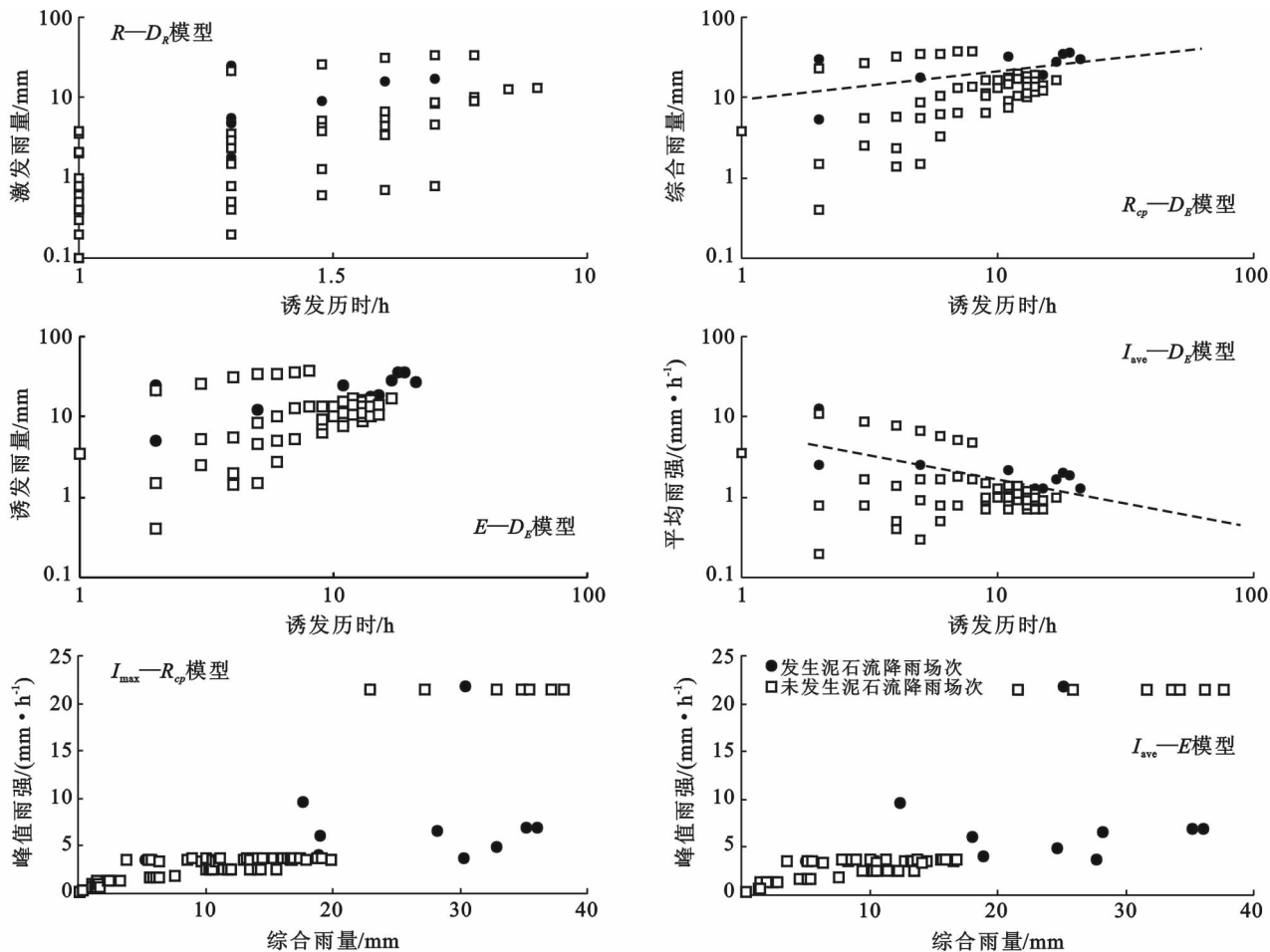


图 3 理县各降雨指标阈值模型

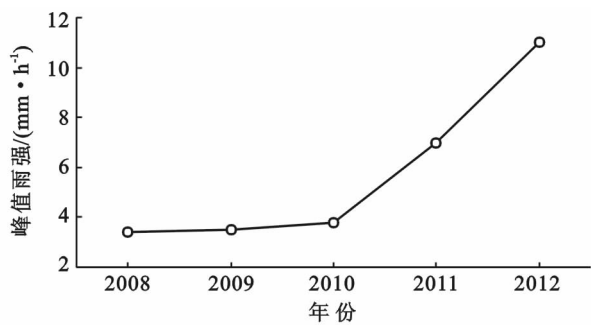


图 4 汶川震后峰值雨强阈值变化

4 讨论与结论

(1) 不同降雨参数对灾害发生的作用不同,建立的预报模型及得出的临界阈值也不同。例如广元(市区)和理县可将平均雨强和诱发历时作为降雨指标,选用一阈值模型。典型区域绝大多数其他子区适宜用多因子模型(如: $R_{cp}-D_E, I_{ave}-D_E, I_{max}-E, I_{max}-R_{cp}$ 等)进行预报,只有汶川地区选用峰值雨强单因子预报模型,其临界阈值在震后呈现上升趋势。

(2) 降雨强度和降雨量在两类灾害的阈值模型

中都作为重要指标应用频率高;滑坡典型区域致灾临界雨量阈值模型在雨量上多选取诱发雨量和有效雨量作为阈值指标,并采用诱发历时作为对应历时指标,泥石流典型区域致灾临界雨量阈值模型在雨量上多选取激发雨量和有效雨量作为阈值指标,并分别采用了诱发历时和激发历时作为对应历时指标;有效雨量作为典型区域滑坡、泥石流阈值模型中共同的重要指标,反映出前期降雨对典型区域两类灾害发生的贡献。

(3) 总体而言,从降雨角度通过统计方法对滑坡、泥石流进行预报,样本的质和量至关重要。受各方条件限制,目前对地质灾害降雨条件分析只能依赖于其附近气象站的降雨资料,这类气象站多为县级基准站,绝大多数并不位于灾害源地,其资料只能部分代表灾害发生当时以及发生之前的雨量信息,所以在对灾害事件进行筛选时,剔除雨量信息明显不能被现有气象站雨量信息表征的灾情个例,以保证资料的实效性。这导致本文的典型区域泥石流灾情样本数有一定的缺陷,未来通过泥石流事件的补充和检验可提高阈值精确度。

(下转第 224 页)

- [4] Lambin E F, Geist H J, Lepers E. Dynamics of Land-use and land-cover change in tropical regions[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28(1): 205-241.
- [5] Goldewijk K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets [J]. *GeoJournal*, 2004, 61(4):335-344.
- [6] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径[J]. *地理研究*, 2001, 20(6): 645-652.
- [7] Jonathan A F, Ruth D F, Gregory P A, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [8] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2002, 32(12):1031-1040.
- [9] Eduardo C R, Van Butsic, Volker C. Radeloff, et al. Technology or policy? Drivers of land cover change in northwestern Spain before and after the accession to European Economic Community [J]. *Land Use Policy*, 2015, 45:18-25.
- [10] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(12):1411-1420.
- [11] 吕立刚, 周生路, 周兵兵, 等. 1985 年以来江苏省土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7):1086-1093.
- [12] 王三, 赵伟, 黄春芳. 基于遥感的重庆市土地利用动态变化研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(2):250-256.
- [13] 魏晓华, 孙阁. 流域生态系统过程与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009:1-26.
- [14] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [15] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1):81-87.
- [16] 宋开山, 刘殿伟, 王宗明. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J]. *地理学报*, 2008, 63(1):93-104.
- [17] 冯永玖, 韩震. 基于遥感的黄浦江沿岸土地利用时空演化特征分析[J]. *国土资源遥感*, 2010(2):91-96.
- [18] 全斌. 土地利用覆盖变化导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [19] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3):229-239.
- [20] 马晴, 李丁, 廖杰, 等. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(1):148-156.
- [21] 雷诚, 张永福. 土地利用变化及驱动因素分析: 以新疆乌苏市为例[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(2):403-409.

(上接第 131 页)

[参 考 文 献]

- [1] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. *Geografiska Annaler*, 1980, 62(1/2):23.
- [2] 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(3):239-267.
- [3] Keefer D K, Wilson R C, Mark R K, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall [J]. *Science*, 1987, 238(4829):921-924.
- [4] Chan R K S, Pun W K. Landslip warning system in Hongkong[J]. *Geotechnical News*, 2004, 22(4):33-35.
- [5] 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(4):97-102.
- [6] 谢正伦, 陆源忠, 游保杉, 等. 泥石流发生临界降雨线设定方法之研究[J]. *中华水土保持学报*, 1995, 26(3):167-172.
- [7] 詹钱登, 李明熹, 土石流发生降雨警戒模式[J]. *中华水土保持学报*, 2004, 35(3):273-283.
- [8] Tang Chuan, Asch T W J W, 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(2):559-576.
- [9] 郭晓军, 范江琳, 崔鹏, 等. 汶川地震灾区泥石流的诱发降雨阈值[J]. *山地学报*, 2015, 33(5):579-586.
- [10] 周伟, 唐川, 周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5):650-655.
- [11] Zhou Wei, Tang Cuan. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, Southwestern China[J]. *Landslides*, 2014, 11(5):877-887.
- [12] Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3):447-458.
- [13] 赵衡, 宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(5):1481-1487.
- [14] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1):2808-2812.
- [15] 胡娟, 闵颖, 李华宏, 等. 云南省山洪地质灾害气象预报预警方法研究[J]. *灾害学*, 2014, 29(1):62-66.