

沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于 TRMM 降雨数据的四川省地质灾害降雨阈值分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 220 - 227. [Shen Lingling, Liu Lianyou, Yang Wentao, et al. Rainfall threshold analysis for the initiation of geological disasters in Sichuan province based on TRMM data[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 220 - 227.]

基于 TRMM 降雨数据的四川省 地质灾害降雨阈值分析*

沈玲玲¹, 刘连友¹, 杨文涛¹, 许冲², 王静璞¹

(1. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 2. 中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029)

摘要: 降雨与地震是引发地质灾害的两个主要原因, 尤其在地震区, 地震导致了大量的滑坡松散堆积物与不稳定斜坡, 在后续降雨条件下极易产生新的地质灾害。另一方面, 高精度降雨数据的缺乏一直是由降雨导致的地质灾害预测预报的瓶颈。因此, 该文尝试应用业内评价较好, 精度较高的 TRMM 降雨数据来获取地质灾害发生前期降雨量。应用 2000 - 2012 年间的 3 h 分辨率的 TRMM 3B42 数据, 结合 2000 - 2012 年间四川发生的重大滑坡泥石流灾害, 提取出每次地质气象灾害发生前 30 d, 15 d, 3 d 和当天的降雨数据。在此基础上, 结合收集来的历次地质气象灾害的临界降雨过程雨量和历时数据, 应用主成分分析法, 将五组数据划分为两大主成分, 并进行分析; 绘制四川省地质气象灾害的降雨强度-历时阈值曲线, 并以汶川地震为分界点, 比较分析了地震前后的阈值变化情况。结果表明, 在四川地区, 滑坡泥石流灾害的发生同时受到降雨和汶川地震的影响。以灾害发生前 30 d, 前 15 d, 前 3 d 有效降雨量因子组成的前期降雨这一主成分在滑坡泥石流灾害中贡献率较高, 其次是以当天降雨和临界降雨过程组成的短历时降雨; 通过对比地震前后的阈值曲线变化发现地震后的阈值更低, 表明强地震后坡面稳定性降低, 引发地质灾害的降雨条件降低。

关键词: TRMM 降雨数据; 地质灾害; 降雨阈值; 汶川地震

中图分类号: X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2015)02 - 0220 - 08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.041

降雨是四川省常见地质灾害的主要诱发因素。由降雨引发的地质灾害又称地质气象灾害^[1]。地质气象灾害主要类型包括滑坡、泥石流。由局部暴雨引发的滑坡、泥石流等灾害占地质灾害的 90% 以上。我国每年夏季汛期, 由降水诱发的滑坡、泥石流等突发性地质灾害占地质灾害总数的 80% 以上, 且大多数分布在西南、西北地区^[2], 在降雨较多的月份, 滑坡和泥石流经常相伴发生。

降雨和地质灾害之间的关系一直是研究的热点问题^[3], 通过对二者之间关系的研究, 可以对地质灾害进行更准确的预报。根据降雨观测进行滑坡、泥石流等地质灾害的预报, 也是地质灾害预报的主要方法^[4-6]。一般的研究集中在两个问题上: ①引发地质灾害的降雨阈值问题; ②前期降雨和临界降雨的主导作用。降雨阈值一般是通过观测灾害发生前前期累积降雨数据和临界降雨数据推测得出。由于地质气象灾害发生地区一般地

形起伏较大, 位置偏僻, 且降雨是一个不连续的过程, 空间上一个点的测量不可能代表较大范围的降水分布^[7], 从县城气象站点监测得到的降雨数据并不能真实地反映出灾害发生地区的降雨值。

虽然政府和科研机构在一些频繁发生地质气象灾害的地区安置了自动监测降雨的设施, 直接获取高风险地区的雨量信息, 避免利用气象站点降水数据插值所带来的误差, 但是对大范围区域来说, 这些设施是远远不够的。应用多普勒天气雷达可以对未来的降雨进行预报^[8], 但是雷达估测降水空间覆盖范围小, 时间序列短^[9-11]。

现阶段降雨资料的稀疏使在地质灾害点上的降雨估计产生很大的偏差, 如何在大范围上获得高精度高准确率的降雨数据是一个普遍存在的问题。本文尝试应用精度较高的 TRMM 数据作为地质灾害点前期降雨量数据的来源。

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫

* 收稿日期: 2014 - 08 - 27 修改日期: 2014 - 10 - 11

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAK10B03)

作者简介: 沈玲玲(1988 -), 女, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要研究方向为地质灾害风险评价与应急管理。

E-mail: garfield1988@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 刘连友(1962 -), 男, 河北保定人, 教授, 主要从事地貌过程与灾害防治。E-mail: lyliu@bnu.edu.cn

星是由美国 NASA (National Aeronautical and Space Administration) 和日本 NASDA (National Space Development Agency) 共同研制的试验卫星, 于 1997 年 11 月 27 日发射成功。TRMM 卫星资料在热带降水的测量、降水预报准确率的提高、暴雨研究、预报模式的数据同化、热带海面温度反演、热带气旋的观测等方面的均有较好应用。因而可以充分地利用 TRMM 的数据资源来改进天气、气候预报的精度。

国内外对 TRMM 降雨数据的验证分析表明 TRMM 数据质量总体比较可靠, 虽然在有些地区和季节具有一定的偏差, 但大都与雨强有关, 且随着时间尺度的增加, TRMM 数据的精度逐渐提高, 因而可有效支持大范围或长尺度的气候模拟预报和降水时空特征分析等^[12-23]。

本文利用 2000 - 2012 年间的 3 h 分辨率的 TRMM 3B42 数据, 在 IDL 中将 3 h 分辨率的数据进行初步处理, 在 ArcGIS 里结合每次灾害发生的地点和时间信息, 提取出历次地质气象灾害发生前 30 d, 15 d, 3 d 和当天的降雨量。在此基础上, 结合收集来的历次地质气象灾害的临界降雨过程雨量和历时数据, 以前 30 d、前 15 d、前 3 d、当天、临界的降雨数据为参数, 应用主成分分析法, 对数据进行分析。应用降雨过程数据得到四川省地质气象灾害的降雨-历时阈值曲线, 并与其他学者绘制的阈值曲线进行比较分析, 最后以汶川地震为分界点, 比较分析了地震前后的阈值变化情况。

1 数据处理与方法

2008 年汶川地震触发了大量的滑坡^[24-25], 这些滑坡产生了大约 60 Gm³ 的松散堆积物质^[26]。此外, 根据汶川地震滑坡危险性评价结果^[27-30], 在一些没有发生滑坡但是处于高危险的地方, 在地震中经历的强烈震动, 往往会导致斜坡岩土体强度降低。这些滑坡松散堆积物质与不稳定斜坡, 在后续强降雨的条件下, 极易产生新的滑坡灾害与泥石流灾害^[31-33]。本文从 2000 - 2012 年间四川省发生的滑坡泥石流灾害原始记录中筛选出有具体发生地点、时间等信息的灾害 56 次, 数据来源为中科院成都山地所和地质环境监测院, 见表 1。

前期降雨数据来源于 TRMM 3B42 (<http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>)。在 ENVI 中进行简单的预处理后在 IDL 中将其合并为一天分辨率的, 方便查找。所用到的四川省多年平均暴雨日数等值线图是用四川省 156 个地面气象站建站以来的有效日降雨数据计算得来, 在 ArcGIS 中绘制成等值线图。所用到的主要方法是主成分分析。主成分分析的主要思想就是通过降维, 在最大程度地保留原指标信息的条件下, 将原本有相关关系的多个指标合并为少量的几个互不相

关的综合指标。这几个综合指标就是原来指标的主要成分。具体步骤如下。

假设某个地理样本 X 有 P 个变量描述:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}。 \quad (1)$$

计算相关系数矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

在式(2)中, $r_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, p)$ 为变量 x_i 与 x_j 的相关系数, 其计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}}。 \quad (3)$$

然后解特征方程求出特征值 $\lambda_i(i = 1, 2, \dots, p)$, 按照大小顺序排列, 分别求出对应于特征值的 λ_i 的特征向量 $e_i(i = 1, 2, \dots, p)$ 。

记主成分为 z_i , 则其贡献率为:

$$z_i = r_i / \sum_{k=1}^p r_k (i = 1, 2, \dots, p)。 \quad (4)$$

累计贡献率为: $\sum_{k=1}^m r_k / \sum_{k=1}^p r_k$ 。

一般取累计贡献率达到 70% 以上的特征值作为主成分, 或者是特征根大于 1 的。

再计算主成分载荷:

$$p(z_k, x_i) = \sqrt{r_k} e_{ki} (i, k = 1, 2, \dots, p)。 \quad (5)$$

则主成分得分为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

2 结果

2.1 滑坡泥石流灾害分布与暴雨关系

从图 1 中可以看出滑坡泥石流灾害点主要分布四川省中部和东部地区, 沿四川盆地边缘分布, 在龙门山一带较为密集。大多数位于年均暴雨日数 2 ~ 4 d 这一区间内。其中约有 77% 的灾害发生在 2 ~ 4 d 这一区间内, 50% 分布在 3 ~ 4 d 区间内, 而

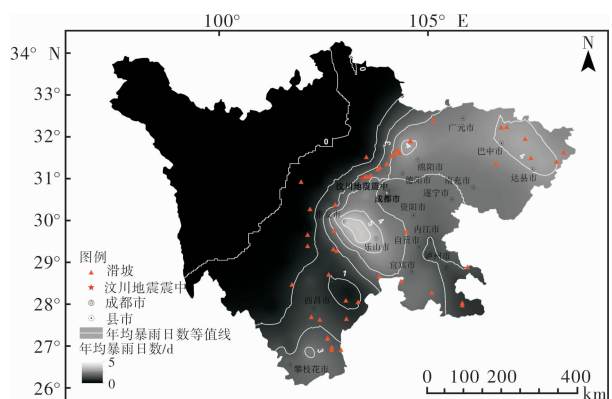


图 1 滑坡泥石流灾害点分布与四川省年均暴雨日数等值线图

表 1 2000 - 2012 年四川省滑坡泥石流灾害事件列表以及 TRMM 提取的降雨量数据

地点	纬度/(°)	经度/(°)	时间/yyyy-mm-dd	当天/mm	前 3 d/mm	前 15 d/mm	前 30 d/mm
泸州市古蔺县	28.04	105.82	2000 - 06 - 06	130.70	38.70	45.78	55.09
凉山州普格县五道箐乡采阿咀沟	27.63	102.41	2003 - 06 - 20	75.13	18.47	35.67	46.74
合江县榕山镇金桂村羊子岩	28.89	105.94	2003 - 06 - 24	83.14	48.97	60.97	76.11
甘孜州丹巴县岳扎乡鹅狼沟	30.93	101.96	2003 - 06 - 26	25.09	32.61	57.43	68.25
黄崩溜沟	29.66	102.12	2003 - 07 - 26	2.12	8.25	31.57	48.70
阿坝藏族羌族自治州汶川县克枯乡下庄村茶园沟	31.53	103.53	2003 - 08 - 09	26.21	27.41	56.92	68.64
兴文县两龙乡三村油坪嘴	28.28	105.09	2004 - 06 - 30	7.21	15.26	32.60	38.69
仪陇县大寅镇街场镇猪儿梁坎下商贸街	31.36	106.63	2004 - 09 - 04	4.60	165.66	178.15	209.01
宣汉县天台乡义和村 1 ~ 9 社	31.42	108.07	2004 - 09 - 05	190.00	176.90	191.12	220.84
美姑县大桥区马洛村史祖沟和侧木洛沟	28.09	103.04	2005 - 05 - 31	23.45	6.49	16.22	18.38
宜宾县横江镇内昆铁路横江段	28.55	104.35	2005 - 07 - 19	107.00	0.00	0.00	0.00
古蔺县龙山镇天堂村 10 社	27.97	105.82	2006 - 06 - 29	87.00	9.95	25.31	36.87
盐源县平川镇骡马村二组	27.70	102.21	2006 - 07 - 14	5.09	15.53	60.13	81.34
青川县红光集镇	32.40	105.13	2006 - 08 - 28	14.17	39.41	54.85	61.81
凉山州雷波县莫红乡千拖村	28.05	103.33	2007 - 05 - 20	15.30	0.95	25.85	31.62
九龙县烟袋乡	28.47	101.75	2007 - 05 - 24	2.70	38.95	60.51	68.49
甘孜州九龙县乌拉溪乡河坝村庙子沟	31.61	100.01	2007 - 05 - 24	3.80	2.84	9.42	12.32
达县青宁乡岩门村	31.51	107.46	2007 - 07 - 07	1.25	126.84	224.07	265.19
屏山县新市镇龙尾社区	28.67	103.84	2007 - 08 - 25	267.00	0.00	0.00	0.00
宁南县新华乡巫土村	26.91	102.69	2008 - 11 - 01	13.73	44.96	51.87	65.75
陈家坝原场镇下游约 1 km 处	31.92	104.58	2008 - 09 - 24	34.02	153.28	155.76	177.64
绵阳市安县桑枣镇三清村	31.62	104.32	2008 - 09 - 25	14.49	139.06	142.59	161.87
宁南县竹寿镇长征村 2 组、6 组	26.97	102.70	2009 - 06 - 21	29.21	51.92	61.06	70.37
北川县陈家坝乡	31.93	104.58	2009 - 07 - 14	11.37	2.17	20.50	27.80
宣汉县樊哙镇大风滩古凤村 3 社	31.64	108.24	2009 - 07 - 16	0.00	0.28	74.35	93.97
都江堰市虹口乡	31.09	103.63	2009 - 07 - 17	38.36	55.08	64.36	73.46
甘孜州康定县舍联乡干沟村响水沟	30.28	102.18	2009 - 07 - 23	0.72	23.38	44.48	51.42
凉山彝族自治州金阳县地洛电站厂房标段钢筋场	27.65	103.05	2009 - 07 - 31	18.23	35.36	49.74	59.53
汉源县顺河乡境内省道 306 线 K73 + 000 ~ K73 + 300	29.28	102.82	2009 - 08 - 06	0.00	0.00	50.68	59.13
国道 318 线天全段小河乡沙湾村水洞溪	30.08	102.74	2010 - 05 - 27	0.00	4.69	10.26	16.23
荣经县花滩镇石桥村阳光组	29.77	102.75	2010 - 07 - 17	210.60	35.29	45.79	55.57
汉源县万工乡双合村一组万工集镇后背山	29.32	102.74	2010 - 07 - 27	0.70	44.86	75.01	85.54
雨城区大兴镇高家村 3 组	29.99	103.04	2010 - 07 - 03	1.33	1.36	19.00	27.12
安县高川乡	31.63	104.20	2010 - 08 - 12	116.39	4.85	52.45	66.65
安县茶坪乡	31.69	104.28	2010 - 08 - 12	118.50	5.52	60.66	80.48
都江堰市龙池镇	31.06	103.55	2010 - 08 - 13	70.26	45.62	80.93	97.34
绵竹市清平乡文家沟	31.56	104.13	2010 - 08 - 13	11.72	89.21	132.05	154.26
汶川县映秀镇红椿沟	31.06	103.49	2010 - 08 - 13	60.83	65.52	77.24	91.93
宁南县新村乡新竹村	27.18	102.60	2010 - 09 - 10	4.96	57.43	70.16	85.60
宁南县新村乡盐巴坪村	27.19	102.60	2010 - 09 - 10	4.96	57.43	70.16	85.60
成昆铁路白果至普雄区段	28.71	102.62	2011 - 06 - 17	17.72	48.67	69.38	83.28
绵竹市清平乡	31.54	104.12	2011 - 06 - 30	5.77	0.00	25.61	31.60
绵阳市北川县陈家坝老场村雷家沟	31.90	104.57	2011 - 08 - 17	119.00	18.62	23.78	38.01
巴中市南江县沙河镇将营村石板沟	32.23	106.75	2011 - 09 - 18	22.85	101.46	159.86	182.40
巴中市南江县关门乡宝峰村 4 社	32.25	106.88	2011 - 09 - 18	24.89	109.26	176.48	199.71
通江县毛裕乡药铺街道	31.96	107.32	2011 - 09 - 18	21.81	101.52	185.60	210.03
甘孜县东谷区四通乡则衣村则衣沟	31.73	100.22	2012 - 06 - 02	17.42	3.37	10.33	15.27
宁南县白鹤滩电站施工区附近矮子沟	26.91	102.92	2012 - 06 - 28	31.41	20.57	61.96	74.68
内江市威远县连界镇土河沟村、连界村	29.74	104.48	2012 - 07 - 22	17.61	89.59	111.14	132.65
四川石棉县草科乡	29.40	102.12	2012 - 08 - 14	34.38	24.54	30.00	39.56
安县高川	31.63	104.20	2012 - 08 - 17	111.67	17.49	30.72	36.32
彭州龙门山镇白水河上游	31.23	103.79	2012 - 08 - 18	7.35	68.72	96.72	114.35
汶川震区的银厂沟区域	31.28	103.85	2012 - 08 - 18	1.33	66.33	84.01	98.31
雅安宝兴县冷木沟	30.39	102.78	2012 - 08 - 18	19.04	42.01	50.41	60.27
德阳什邡市红白镇五桂坪村 5 组	31.36	104.01	2012 - 08 - 18	4.17	82.48	108.71	125.24

这一区间的灾害点又呈线状沿龙门山断裂带分布,位于四川盆地与川西高原的交界处。这一片区域内的灾害都是发生在汶川地震之后,且处于汶川地震Ⅹ度区内,这种分布特征显示了滑坡泥石流灾害同时受降雨与地震烈度的影响。由此可见,滑坡泥石流灾害发生不仅与暴雨有关还与地震有关。

2.2 降雨指标主成分分析

基于 TRMM 数据提取出灾害发生前 30 d 的降雨量,前 15 d 的降雨量,前 3 d 的降雨量和当天降雨量,应用 Crozier 在 1986 年提出的有效降前期降雨量公式来计算有效前期降雨量:

$$CAR_x = KP_1 + K^2 P_2 + \cdots + K^n P_n \quad (7)$$

CAR_x 表示第 x 天的有效前期降雨量; P_1 表示 x 天前一天的日降雨量; P_n 表示 x 天前 n 天的降雨量。 K 为衰减参数,是一个经验常数,一般在 $[0.8, 0.9]$ 这一区间取值。在本文中,参考前人的研究经验取 K 值为 0.8^[34-35]。一般来说,有效前期降雨量的时长尺度可以选择 3, 5, 10, 15, 30 d^[36],也有学者根据研究区的不同而选择其他类型的时长尺度。本文选择了 30 d、15 d、3 d 这三个前期降雨时长为指标。

以前 30 d、前 15 d、前 3 d、当天、以及临界降雨过程雨量为参数,五个因子的相关系数矩阵 (Correlation Matrix) 经 Bartlett 检验结果为: Bartlett 值等于 372.950, $P < 0.0001$,表明相关系数矩阵不是一个单位矩阵,故可以进行因子分析。应用主成分分析,结果如表 2 所示。

表 2 主成分载荷矩阵

降雨指标	第一主成分	第二主成分
前 15 d	0.990	-0.013
前 30 d	0.986	-0.016
前 3 d	0.935	0.004
当天降雨量	-0.235	0.843
临界雨量	0.425	0.680

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验是用于比较观测相关系数值与偏相关系数值的一个指标,其值愈逼近 1,表明对这些变量进行因子分析的效果愈好。本文中的 KMO 值约等于 0.7,表示因子分析的结果一般,处于可接受的水平。

在解释的总方差中,第一主成分和第二主成分的累积贡献率达到 84.714%,且第一主成分和第二主成分的特征值都大于 1,即可以用这两个主成分来解释滑坡泥石流灾害。从表 2 中可以很明显地看出,以前 30 d、前 15 d、前 3 d 为代表的前期有效累积降雨量对滑坡泥石流的作用影响较大。根据计算结果可将滑坡泥石流的主要影响因素分成两类:前期降雨和短历时降雨。在影响滑坡的降雨因素中,短历时降雨和前期累积降雨量都是重要影响因素,对不同的地区而言,两个因素的主导地位也是不一样的。崔鹏等的研究表明,前

期降雨是影响云南省昆明市东川区蒋家沟泥石流发生的最重要的因素,在所有降雨指标中贡献超过 80%^[37]。马超等通过对比汶川地震后泥石流和台湾集集地震地震后泥石流的特征,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^[38]。

从图 2 中可以看出,滑坡泥石流灾害发生的当天和前期降雨之间的关系可分为两类:①是前期降雨量少,当天降雨量高;②是当天降雨量少而前期累积的降雨量多;其中第二类的占了绝大多数。这表明了前期降雨充足的情况下,只需要不多的当天降雨就能引发滑坡泥石流灾害,也说明了对滑坡泥石流灾害来说,前期降雨的影响作用是相当大的。这与主成分分析的结果一致。

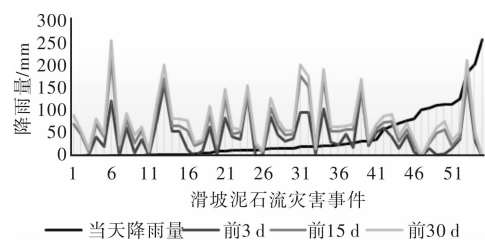


图 2 滑坡泥石流事件各降水指标值

2.3 降雨阈值分析

1980 年 Nel Caine 列举了世界范围内 73 次导致浅层滑坡和泥石流的降雨持续时间和强度。率先提出浅层滑坡和泥石流的全球降雨强度——历时 (ID) 阈值^[39]。此后学术界陆续提出了不同范围尺度 (地区、区域、全球) 的降雨阈值^[40-43]。降雨阈值可以通过研究降雨作用于边坡的物理过程或基于历史资料或统计数据的经验性公式得到。以滑坡为例,研究降雨引发的滑坡一般有两种途径:①是基于历史数据的统计分析方法,研究降雨和滑坡的相关性规律;②是研究降雨入渗引发滑坡的物理过程,对边坡稳定性进行力学分析并建立相应的分析模型^[44]。基于统计资料的滑坡降雨阈值研究,数据客观易得,不需要复杂严格的数学推导和物理过程研究,分析结果简单直观,应用方便,因而发展较为成熟;而就第二种途径来说,降雨引发的边坡失稳,过程复杂涉及的参数众多,降雨过程中产生的地表水渗透到岩土体中增加了坡体的自重,增大了孔隙水压力,使处于极限平衡状态的坡体发生滑动;地表水进入地下转变成地下水会浸泡软化滑动面,降低坡体的抗剪强度^[45]。模型需要的参数众多,当研究区范围较大时,很难得到精确的数据;而且模型在研究区之外的其他地区应用也具有局限性。经验型降雨阈值一般是在笛卡尔坐标,半对数或对数坐标里,以导致滑坡发生的降雨条件作为横纵轴参数,以数据分布的下部界线作为阈值^[46],结果直观易懂。

基于过程降雨分析,得到的可能或不可能引发滑坡降雨的阈值主要有四种类型:①降雨强度

- 历时阈值 (ID); ②使用平均年降雨量 (MAP), 全年雨天平均降水量 (RDN) 或其他参数进行规格化的阈值; ③过程累积雨量 - 历时 (ED) 阈值; ④过程累积雨量 - 降雨强度 (EI) 阈值^[47]。其中第一种类型是应用最多的一种。

本文利用历次灾害发生的降雨过程雨量和雨强, 对 56 次地质气象灾害进行了降雨阈值历时分析, 并与其他学者所做的其他区域阈值进行对比。为了减少地区间的差异, 方便作对比, 用各地区的年平均降雨量 (MAP) 对降雨强度进行规格化, 结果如图 3、图 4 所示。

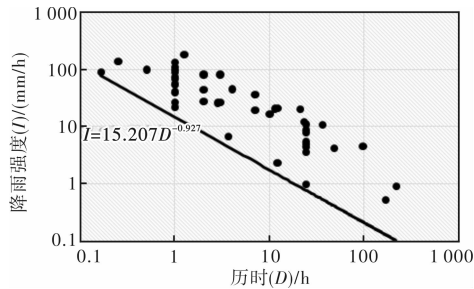


图 3 引发四川省滑坡泥石流灾害的降雨强度 - 历时 (ID) 阈值

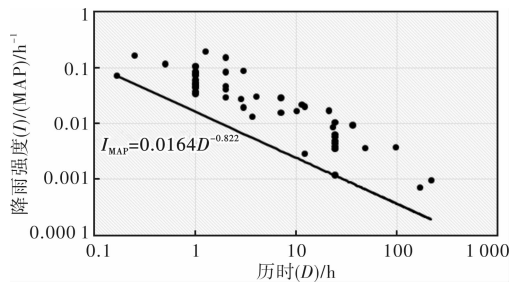


图 4 经规格化后的引发滑坡泥石流灾害的降雨强度 - 历时 (ID) 阈值

表 3 不同地区的 ID 阈值曲线

地区	ID 拟合方程	D 值区间
全球 (Caine, 1980) ^[39]	$I = 14.82 \times D^{-0.39}$	$0.167 < D < 500$
全球 (Guzzetti et al., 2008) ^[46]	$I = 2.2 \times D^{-0.44}$	$0.1 < D < 1000$
中国台湾省 ^[48]	$I = 115.47 \times D^{-0.80}$	$1 < D < 400$
文家沟 ^[49]	$I = 25.962 \times D^{-0.239}$	$3 < D < 12$
浙江省 ^[50]	$I = 26.9163 \times D^{-0.539}$	$1 < D < 100$
鄂西 ^[51]	$I = 4.0 \times D^{-0.51}$	$1 < D < 300$
福建省 ^[52]	$I = 84.31 \times D^{-0.58}$	$1 < D < 15$

从图 5 中可以看出, 四川省的阈值曲线高于鄂西地区和全球的, 但是低于福建、台湾省和文家沟地区的, 与浙江省的近似但是略低于。浙江、福建、台湾地处东南丘陵沿海或岛屿, 年降雨量和年极端降雨量均比较大, 又时常遭受台风影响; 而鄂西地区以及全球的降雨量相对来说比较小。由此可见, 年降雨量和年极端降雨量大的地区触发滑坡的降雨阈值高。文家沟地区在整个四川省来说, 年降雨量, 年均暴雨特大暴雨日数并不突出, 降雨阈值数据来源于地震后的五次泥石流事

件, 因此阈值的高低直接反映了地震对滑坡泥石流的影响。

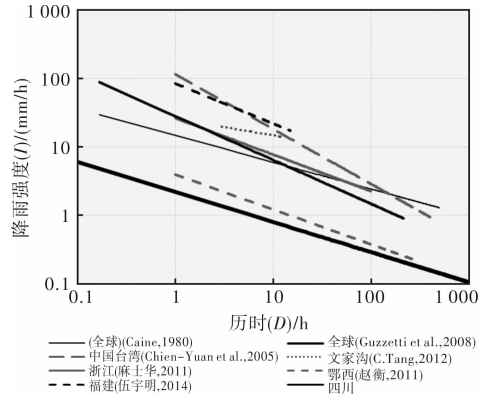


图 5 四川省阈值曲线与其他地区阈值曲线的比较

2.4 地震前后阈值对比

从图 6、图 7 中可以明显地看出地震后的阈值低于地震前的降雨阈值。强地震对斜坡稳定性的影响是长期的, 主要表现在地震会造成区域内固体松散物质增多, 山体稳定性变差。地震后地理环境因素的变化会导致震后区域更脆弱, 更易受到地质灾害的威胁。因而, 较低的降雨量或降雨强度就可能引发更严重的地质灾害。以汶川强震区为例, 研究认为至少在近 10 年内, 滑坡和泥石流活动趋势是强烈的, 之后地质条件将逐渐趋于稳定^[53]; 也有学者认为汶川地震对当地地质灾害的影响将持续 20~25 年^[54]; 虽然一些研究结论所得到的汶川地震后地质灾害活动持续时间长短有别^[55-57], 但是毫无争议的一点是汶川地震后, 地

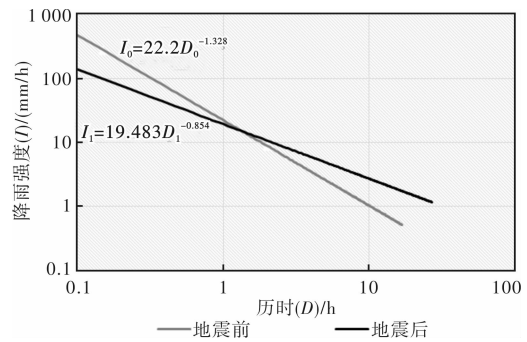


图 6 地震前后滑坡泥石流灾害的降雨强度 - 历时 (ID) 阈值对比

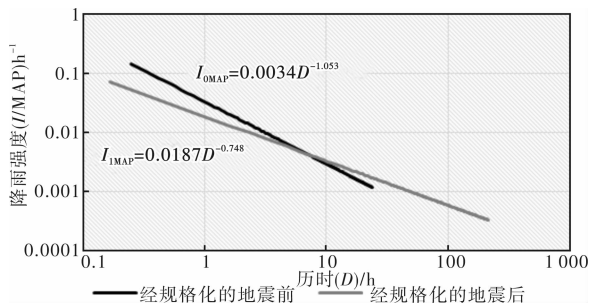


图 7 经规格化后的地震前后滑坡泥石流灾害的降雨强度 - 历时 (ID) 阈值对比

质灾害活动将在一段时间内处于活跃时期, 长期的总体趋势是回归正常水平。对 1923 年关东大地震和 1997 年的集集地震的研究同样也得到类似结论^[58-59]。谢正伦和范正成的研究则认为由于地震影响, 震后泥石流的激发雨量有一个先降低后逐步回升至接近正常水平的趋势^[60-61]。

地震后地质灾害活跃度提高主要体现在滑坡泥石流所需的降雨条件降低。以都江堰龙池地区为例, 该地区在汶川地震前, 几乎没有过泥石流的记录; 然而在 2010 年 8 月 13 日该地区暴发了大规模的群发性泥石流。对气象资料分析显示, 2010 年 8 月 13 日的 1 h 降雨强度为 20 年一遇型^[62]。台湾集集地震后, 陈有兰流域的泥石流爆发临界雨量相对于震前降低了 2/3^[63], 而汶川地震后, 北川县泥石流暴发的前期累积雨量降低约 14.8% ~ 22.1%, 小时雨强降低了约 25.4% ~ 31.6%^[64]。汶川地震后, 绵竹清平乡的地质灾害群发的降雨阈值降低了 59.15%^[65], 泥石流暴发所需的强降雨时间缩短, 启动泥石流的临界雨量降低^[66]。

3 结论与讨论

近些年来, 全球气候变暖造成的降雨异常, 使得地质灾害频发。高精度降雨数据的缺乏一直是由降雨导致的地质灾害预测预报的瓶颈。本文尝试应用业内评价较好, 精度较高的 TRMM 降雨数据来获取地质灾害发生前期降雨量。应用 2000 - 2012 年间的 3 h 分辨率的 TRMM 3B42 数据, 结合 2000 年以来四川发生的重大滑坡泥石流灾害, 提取出每次地质气象灾害发生前 30 d、15 d、3 d 和当天的降雨数据。在此基础上, 结合收集来的历次地质气象灾害的降雨过程雨量和历时数据, 以前 30 d、前 15 d、前 3 d、当天、临界降雨过程的降雨数据为参数, 应用主成分分析法, 将五组数据划分为两大主成分, 并进行分析; 应用降雨过程数据得到四川省地质气象灾害的降雨历时 - 阈值曲线; 将降雨强度用各地区的年均降雨量进行规格化, 并以汶川地震为分界点, 比较分析了地震前后的阈值变化情况。

结果表明, 在四川地区, 滑坡泥石流灾害的发生同时受到降雨和汶川地震的影响, 从灾害点的空间分布上可以很明显的看到这一点。以前 30 d、前 15 d、前 3 d 前期有效降雨量组成的前期降雨这一主成分在滑坡泥石流灾害中贡献率较高, 其次是以当天降雨和临界降雨过程组成的短历时降雨。将建立的四川省地质灾害降雨强度 - 历时阈值(ID)曲线与其他学者所做的曲线相对比, 从侧面说明了降雨量大的地方阈值一般比较高。通过对比地震前后的阈值曲线变化发现地震后的阈值更低, 表明强地震后坡面稳定性降低, 引发地

质灾害的降雨条件降低。

2000 - 2012 年间, 四川省发生的有记录的地质灾害达四百多条, 绝大多数没有准确的发生地点和时间, 也没有造成重大损失和人员伤亡。本文从中挑选出 56 次具有代表意义的造成重要伤亡的, 且有准确发生时间和地点的地质灾害, 主要以浅层滑坡和泥石流为主。但作为经验性的统计规律发现, 原始数据还是显得不够充分。

参考文献:

- [1] 马力, 崔鹏, 周国兵, 等. 地质气象灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [2] 毕宝贵, 徐晶, 张国平. 国家气象中心地质灾害气象预报业务进展[C]//中国气象学会. 2006 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国气象学会, 2006: 19 - 29.
- [3] 陈静静, 姚蓉, 文强, 等. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 42 - 47.
- [4] 谭万沛. 中国泥石流分布特点与活动规律的研究[J]. 铁道工程学报, 1986, 4: 96 - 100.
- [5] 姚令侃. 用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 72 - 77.
- [6] 张国平, 许凤雯, 赵琳娜. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010, 36(2): 81 - 86.
- [7] Wilheit T T, Chang A, Rao M V, et al. A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans[J]. Journal of applied meteorology, 1977, 16(5): 551 - 560.
- [8] Chang K T, Chiang S H. An integrated model for predicting rainfall-induced landslides[J]. Geomorphology, 2009, 105(3): 366 - 373.
- [9] 陈栋, 郁淑华, 江玉华. 青藏高原东部泥石流滑坡的雷达监测研究[J]. 高原气象, 2004(s1): 130 - 133.
- [10] 杜惠良, 钮学新, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡, 泥石流多发区气象预警研究[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 151 - 158.
- [11] 张京红, 韦方强, 邓波, 等. 区域泥石流短临预报及其应用——基于多普勒天气雷达技术的预报系统[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 71 - 77.
- [12] 韦芬芬, 汤剑平, 惠品宏. 基于雨量计的高分辨率格点降水数据与 TRMM 卫星反演降水数据在亚洲区域的比较[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2013, 3(49): 320 - 330.
- [13] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38 - 55.
- [14] 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 343 - 348.
- [15] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 461 - 466.
- [16] Beighley R, Ray R, He Y, et al. Comparing satellite derived precipitation datasets using the Hillslope River Routing (HRR) model in the Congo River Basin[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(20): 3216 - 3229.
- [17] Cohen Liechti T, Matos J P, Boillat J L, et al. Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(2): 489 - 500.
- [18] Han W S, Burian S J, Shepherd J M. Assessment of satellite-based rainfall estimates in urban areas in different geographic and

- climatic regions [J]. *Natural hazards*, 2011, 56 (3): 733 – 747.
- [19] Islam M N, Uyeda H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 264 – 276.
- [20] Koo M S, Hong S Y, Kim J. An evaluation of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) data over South Korea[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 45(3): 265 – 282.
- [21] Ouma Y O, Owiti T, Kipkorir E, et al. Multitemporal comparative analysis of TRMM-3B42 satellite-estimated rainfall with surface gauge data at basin scales: daily, decadal and monthly evaluations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33 (24): 7662 – 7684.
- [22] Tarnavsky E, Mulligan M, Husak G. Spatial disaggregation and intensity correction of TRMM-based rainfall time series for hydrological applications in dryland catchments[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 248 – 264.
- [23] Zhu Q, Chen X, Fan Q, et al. A new procedure to estimate the rainfall erosivity factor based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(9): 2437 – 2445.
- [24] Xu C, Xu X W, Yao X, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441 – 461.
- [25] 许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 等. 2008 年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(1): 25 – 44.
- [26] 许冲, 徐锡伟. 2008 年汶川地震导致的斜坡物质响应率及其空间分布规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32 (Supp. 2): 3888 – 3908.
- [27] Xu C, Dai F C, Xu X W, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. *Geomorphology*, 2012, 145 – 146: 70 – 80.
- [28] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 46: 317 – 329.
- [29] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Application of an incomplete landslide inventory, logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping related to the May 12, 2008 Wenchuan earthquake of China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68 (2): 883 – 900.
- [30] Xu C, Xu X W, Yao Q, et al. GIS-based bivariate statistical modelling for earthquake-triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2013, 46 (2): 221 – 236.
- [31] Tang C, Asch T W J van, 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.
- [32] 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]. *Landslides*, 2011, 8(4): 485 – 497.
- [33] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187 – 194.
- [34] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析 [C]//全国泥石流学术论文集. 1985: 93 – 99.
- [35] 田冰, 王裕宜, 洪勇. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系——以云南省蒋家沟为例[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(2): 71 – 75.
- [36] Zêzere J, Trigo R, Trigo I. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2005, 5(3): 331 – 344.
- [37] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Aleotti, P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(3): 247 – 265.
- [41] Baum R L, Godt J W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA[J]. *Landslides*, 2010, 7 (3): 259 – 272.
- [42] Corominas J. Landslides and climate [C]//VIII international symposium on landslides, Cardiff, UK, Keynote lectures, CD _ ROM, 2000.
- [43] Crosta G B, Frattini P. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow [C]//Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms. Siena, Italy, 2001: 463 – 487.
- [44] 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 (3/4): 239 – 267.
- [45] 丁继新, 尚彦军, 杨志法, 等. 降雨型滑坡预报新方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3738 – 3743.
- [46] 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(1): 3 – 17.
- [47] 李长江, 麻士华, 朱兴盛. 降雨型滑坡预报的理论, 方法及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [48] Chen, C. -Y., T. -C. Chen, F. -C. Yu, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(5): 715 – 724.
- [49] Tang C, Asch T W van, 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: 559 – 576.
- [50] 麻士华, 李长江, 孙乐玲, 等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22 (2): 20 – 25.
- [51] 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.
- [52] 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. *工程地质学报*, 2014, 2 (22): 255 – 262.
- [53] 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(3): 341 – 349.
- [54] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(2): 145 – 151.
- [55] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 280 – 282.
- [56] 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(4): 501 – 509.
- [57] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J].

- 地质灾害与环境保护, 2009(2): 86-93.
- [58] Liu C N, Huang H F, Dong J J. Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in central Taiwan [J]. *Natural hazards*, 2008, 47(3): 349-368.
- [59] 林冠慧, 张长义. 巨大灾害后的脆弱性: 台湾集集地震后中部地区土地利用与覆盖变迁[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 201-210.
- [60] Shieh C L, Chen Y S, Tsai Y J, et al. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(2): 177-188.
- [61] 范正成, 刘哲欣, 吴明峰. 南投地区土石流发生临界降雨线之设定及其于集集大地震后之修正[J]. *中华水土保持学报*, 2002, 1(33): 31-38.
- [62] 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*, 2012, 29(6): 738-746.
- [63] 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(1/2): 49-61.
- [64] 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.
- [65] 田述军, 孔纪名. 基于区域降雨分布的震后地质灾害降雨阈值研究——以绵竹市清平乡为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 237-240.
- [66] 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.

Rainfall Threshold Analysis for the Initiation of Geological Disasters in Sichuan Province Based on TRMM Data

Shen Lingling¹, Liu Lianyou¹, Yang Wentao¹, Xu Chong² and Wang Jingpu¹

(1. *Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, MOE, State Key Lab of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*)

Abstract: Rainfall and earthquake are the two main triggers of geological disasters. In earthquake zones, earthquake could cause a lot of loose deposits and unstable slopes, which are prone to generate new geological disasters under the subsequent rainfall after earthquake. On the other hand, the lack of high resolution rainfall data is the bottleneck of rainfall induced geological disasters forecasting. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data is accorded a high opinion due to its good accuracy. Therefore, the early rainfall data of geological disasters are attempted to be gotten by TRMM data. Based on the inventory of major geological disasters occurred in Sichuan Province since 2000, by using 3 hours resolution TRMM 3B42 data during 2000-2012, the rainfall data of each geological meteorological disasters before 30 days, 15 days, 3 days and the day are extracted. Then, combined with the critical rainfall and duration data included on the inventory, by applying the principal component analysis, the five data sets are divided into two main components. At last, the rainfall duration-threshold curves of geological meteorological disasters in Sichuan are drawn, and the threshold changes before and after Wenchuan earthquake are analyzed comparatively. Results show that in Sichuan Province, the occurrence and distribution of landslide disaster are affected by rainfall and Wenchuan earthquake. The effective rainfall data of 30 days, 15 days and 3 days before disasters have a higher contribution rate on landslide, which composed the early rainfall factor and regarded as the first main ingredient. Followed by the second main ingredient, which is the short duration rainfall factor composes of the day's rainfall data and the critical rainfall data. By comparing the rainfall threshold curves before and after the earthquake, it reveals that the threshold is lower after earthquake, indicating an unstable state of slope after strong earthquakes which cause low rainfall condition to initiate geological disasters.

Key words: TRMM data; geological disaster; rainfall threshold; Wenchuan earthquake