

薛志航, 邓 创, 樊晓一, 等. 汶川地震扰动区小流域地质灾害风险概率问题[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 39–45. [XUE Zhihang, DENG Chuang, FAN Xiaoyi, et al. Geological Hazards of Small Watershed Risk Probability in Wenchuan Earthquake Disturbance Area[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 39–45.]

## 汶川地震扰动区小流域地质灾害风险概率问题<sup>\*</sup>

薛志航<sup>1</sup>, 邓 创<sup>2</sup>, 樊晓一<sup>3</sup>, 乔建平<sup>4</sup>, 王 萌<sup>4</sup>, 吴彩燕<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司电力应急中心, 四川 成都 610000; 3. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

4. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 汶川地震扰动区地质灾害的特点是滑坡崩塌极为发育, 泥石流物源丰富, 灾害发生频率高。以都江堰白沙河小流域为例, 在完成小流域风险区划的基础上, 采用 Logistic 回归统计模型分别对震后小流域中滑坡泥石流发生的临界降雨量及时间概率, 不同等级风险区(高、较高、中等、较低, 共4级风险区)滑坡泥石流发生的临界雨量及空间概率进行分析统计。研究表明当日降雨量是触发滑坡泥石流的时间条件, 发生概率为0.7~0.9。大暴雨是触发高、较高风险区滑坡泥石流的时空条件, 发生概率可达到0.9。发生风险损失的临界雨量为大暴雨。

**关键词:** 汶川地震; 扰动区; 小流域; 地质灾害; 临界雨量; 风险概率

**中图分类号:** X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)03-0039-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.03.007

汶川8.0级大地震发生后, 地震扰动区在强震作用下滑坡泥石流的发育状况超乎寻常。频率高、规模大、分布广成为基本特点。这些次生地质灾害基本都与降雨相关, 亦即降雨量控制了灾害的发生频率。因为风险评估中, 必须涉及到滑坡泥石流概率发生的问题, 否则风险管理将陷入盲目。但到目前为止, 对地震扰动区小流域在降雨条件下地质灾害发生的概率问题<sup>[1-20]</sup>进行的探讨比较少。强震作用对斜坡稳定性具有长期的影响作用, 特别是连续的强降雨使震后的泥石流接连发生。但是, 对于强震后的滑坡泥石流活动性能持续到何时才能趋于减弱, 至今还没有实际而理想的趋势预测模型。由于缺少有效监测数据来建立随时间的后续降雨量和滑坡泥石流之间的关系, 震后滑坡泥石流的发育规律和活动特征还不能被人们完全掌握。因此, 通过研究地震扰动区小流域滑坡泥石流的发生概率, 预测滑坡泥石流发育趋势具有重要的价值。笔者已对小流域滑坡泥石流

进行了风险区划研究, 分析了汶川地震扰动区滑坡泥石流发育的特点, 阐述了研究小流域滑坡泥石流的意义, 划分了5级风险区<sup>[21]</sup>。在此基础上, 本文将统计分析小流域滑坡泥石流风险的时间概率和空间概率, 为下一阶段的风险评估提供依据<sup>[22]</sup>。

### 1 回归统计模型

对于滑坡泥石流而言, 从统计学角度出发, 对其产生影响的各因子数据均可作为自变量, 而灾害发生与不发生可以作为分类因变量。由于均不是连续变量, 因此, 线性回归并不适用于推导此类自变量和因变量之间的关系。所以, 通常采用对数线性模型(log-linear model), 而 Logistic 回归模型即对数线性模型的一种特殊形式。设  $p$  为某事件发生的概率, 取值范围为 $[0, 1]$ ,  $(1-p)$ 即为该事件不发生的概率, 将其两者的比值取自然

\* 收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-03-16

基金项目: 国家电网公司科技项目(521999150031); 国家自然科学基金项目(41272297); 科技部重点国际合作项目(2013DFA21720); 国家青年科学基金(41301592); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主支持基金项目资助(2013年度); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2015228/KY)

第一作者简介: 薛志航(1987-), 男, 四川德阳人, 硕士, 工程师, 主要从事电网防灾减灾。E-mail: xuezhihang2@163.com

通讯作者: 樊晓一(1974-), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。

E-mail: xyfan1003@126.com

对数  $\ln[ p/(1-p) ]$ ，以  $p$  为因变量， $x_m$  为自变量，建立线性 Logistic 回归方程：

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为常数， $\beta_i (i = 1, 2, \cdots, m)$  为逻辑回归系数。Logistic 回归模型是普通多元线性回归模型的推广，但它的误差项服从二项分布而非正态分布。

由式(1)可得

$$p = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m)} \quad (2)$$

利用式(2)可以对滑坡泥石流发生概率进行预测。但是，对于滑坡泥石流而言，其难点主要在于自变量的选择及雨量数据的获取上。

## 2 雨量数据选择

滑坡泥石流分析的雨量数据一般是当天及前几天(每天)的雨量记录，有些地区也选用小时甚至分钟雨量来进行分析，但是考虑到滑坡泥石流灾害发生特点及多数地区实际监测情况，当天及前几天的雨量则成为最重要、最通用的分析数据。但是地表径流的产生、水分的蒸发等过程的存在，会使进入岩土体的雨量小于实际记录雨量，即记录到的雨量特别是前期降雨不能全部对滑坡泥石流的发生产生影响。故本文采用前期有效降雨量的概念。所谓“前期有效降雨量”，是指灾害发生

前的降雨过程中对斜坡岩土体稳定性产生作用的雨量。国外学者对此已作过相应的研究，并提出了计算进入岩土体雨量的经验公式<sup>[18]</sup>：

$$r_{a0} = kr_1 + k^2 r_2 + \cdots + k^n r_n \quad (3)$$

式中： $r_{a0}$  为灾害发生时的前期有效降雨量， $k$  为有效降雨量系数( $k \leq 1$ )， $r_n$  为前第  $n$  天的降雨量。有效降雨量系数  $k$  表示岩土体对雨水滞留能力的大小，由区域内岩土体总体性质决定，一般取 0.84。将前期有效降雨量和当日雨量作为自变量，利用雨量和滑坡泥石流的历史记录数据就可以进行滑坡泥石流临界雨量的分析，得到不同降雨情况下滑坡泥石流的发生概率。

## 3 时间概率问题

小流域内滑坡泥石流诱发因素主要为降雨条件。临界降雨量是时间预警的关键。降雨量一般可以由前期雨量和当日雨量组成。根据笔者统计，汶川地震扰动区的滑坡泥石流主要都受到当日雨量控制。当日降雨诱发的滑坡泥石流，基本对应了事件发生的时间。在此时间内，多大降雨量触发滑坡泥石流可能性有多大，这种可能性便称为风险发生的时间概率。

### 3.1 降雨量及灾害事件统计

根据野外实地调查和气象局的资料，表 1 给出了白沙河小流域滑坡泥石流和当日、前期降雨量数据。

表 1 白沙河小流域流域 2009 - 2013 年发生滑坡泥石流的时间及雨量

时间	当日雨量 $R_0/\text{mm}$	前 1 d 累计雨量 $R_1/\text{mm}$	前 2 d 累计雨量 $R_2/\text{mm}$	前 3 d 累计雨量 $R_3/\text{mm}$	前 4 d 累计雨量 $R_4/\text{mm}$	前 5 d 累计雨量 $R_5/\text{mm}$	前 6 d 累计雨量 $R_6/\text{mm}$	当日发生滑 坡泥石流数
2009. 07. 17	15. 1	2. 4	4. 1	0	0. 6	0	0	3
2010. 08. 13	40. 5	15. 6	0	0	59. 7	23. 4	1. 2	12
2010. 08. 14	51. 4	40. 5	15. 6	0	0	59. 7	23. 4	1
2010. 08. 18	16. 2	1. 8	0	0	51. 4	40. 5	15. 6	4
2010. 08. 19	159. 6	16. 2	1. 8	0	0	51. 4	40. 5	1
2010. 09. 07	42. 6	3. 1	19. 6	15. 5	31. 2	0. 6	10. 8	1
2011. 07. 05	34. 4	4. 3	78. 8	12. 7	2. 1	93. 5	0. 7	1
2011. 08. 15	99. 6	6. 8	0. 2	0	0	0. 1	2. 1	1
2011. 08. 16	28. 6	99. 6	6. 8	0. 2	0	0	0. 1	1
2011. 08. 21	37. 1	0. 3	6. 6	20. 4	2. 6	28. 6	99. 6	7
2011. 09. 05	77. 7	0	1. 5	12. 1	0	0	0	1
2012. 05. 01	39. 5	0. 2	4. 4	1. 2	0	0	3. 4	1
2012. 05. 11	44. 1	0	4. 3	0	0	0. 2	0	1
2012. 07. 27	40. 8	6. 9	0	0. 1	6. 7	8. 1	21. 1	1
2012. 08. 17	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	0	4
2012. 08. 18	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	7
2012. 08. 19	43. 9	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	3
2012. 09. 15	53. 4	10. 1	0	0	3. 6	0	15. 2	1
2013. 07. 08	18	3. 2	0. 1	0. 1	49. 8	5. 6	3. 9	1
2013. 07. 09	423. 8	18	3. 2	0. 1	0. 1	49. 8	5. 6	7
2013. 07. 13	35. 9	71. 8	199. 3	423. 8	18	3. 2	0. 1	3
2013. 07. 25	85	0	0	6. 6	1. 1	0	0	1
2013. 07. 29	39. 1	36. 9	59. 2	11. 9	85	0	0	1

### 3.2 当日降雨量诱发灾害的概率

依据灾害发生当日的降雨量等值线图进行雨量站点数据和灾害发生地雨量的对应,选取灾害发生当日降雨量作为灾害雨量,灾害发生前的降雨数据作为未发生灾害的样本。利用 Logistic 回归模型进行分析,由式(2)得到灾害发生时间概率  $p$  与当日降雨量  $R_0$  的概率关系(表2),即:

$$p = \frac{\exp(-3.715 + 0.122R_0)}{1 + \exp(-3.715 + 0.122R_0)} \quad (4)$$

表2 滑坡泥石流与当日雨量的概率分析

时间	当日降雨量 $R_0/\text{mm}$	分类(1 = 发生, 0 = 未发生)	预测概率	预测分类(1 = 发生, 0 = 未发生)
2009.07.17	15.1	1	0.54	1
2010.08.13	40.5	1	0.77	1
2010.08.14	51.4	1	0.93	1
2010.08.18	16.2	1	0.15	0
2010.08.19	159.6	1	1.00	1
2010.09.07	42.6	1	0.81	1
2011.07.05	34.4	1	0.62	1
2011.08.15	99.6	1	1.00	1
2011.08.16	28.6	1	0.44	0
2011.08.21	37.1	1	0.69	1
2011.09.05	77.7	1	1.00	1
2012.05.01	39.5	1	0.75	1
2012.05.11	44.1	1	0.84	1
2012.07.27	40.8	1	0.78	1
2012.08.17	19.9	1	0.22	0
2012.08.18	114.5	1	1.00	1
2012.08.19	43.9	1	0.84	1
2012.09.15	53.4	1	0.94	1
2013.07.08	18	1	0.18	0
2013.07.09	423.8	1	1.00	1
2013.07.13	35.9	1	0.66	1
2013.07.25	85	1	1.00	1
2013.07.29	39.1	1	0.74	1
2009.08.04	21.4	0	0.25	0
2010.08.05	17.5	0	0.17	0
2010.09.21	20	0	0.22	0
2011.07.04	12.7	0	0.10	0
2011.09.18	19.5	0	0.21	0
2011.08.18	20.4	0	0.23	0
2011.03.21	32.6	0	0.56	1
2012.05.12	20.9	0	0.24	0
2012.07.21	21.1	0	0.24	0
2012.07.29	21	0	0.24	0
2012.09.25	28.9	0	0.45	0
2012.10.04	41.4	0	0.79	1
2012.10.13	29.1	0	0.46	0
2013.05.08	44.7	0	0.85	1
2013.06.20	25.7	0	0.36	0
2013.08.19	24.6	0	0.33	0
2013.09.19	24.9	0	0.33	0
2013.06.09	14.7	0	0.13	0

由表2得到当日降雨量条件下,滑坡泥石流发生概率分布图(图1)。图中表明,当日降雨量达到30~40 mm时,灾害发生的概率约为0.5,当日降雨量达到50 mm时,灾害发生的概率为0.7(表3)。

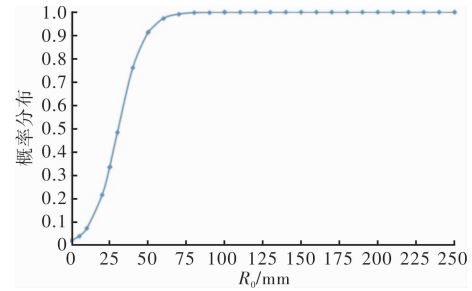


图1 白沙河小流域当日降雨量诱发灾害时间概率分布图

表3 当日降雨条件下白沙河小流域灾害发生时间概率统计表

雨量等级	当日降雨量/mm	灾害发生概率
小雨	< 10	< 0.1
中雨	10 ~ 24.9	0.1 ~ 0.3
大雨	25 ~ 49.9	0.3 ~ 0.5
暴雨	50 ~ 99.9	0.5 ~ 0.7
大暴雨	100 ~ 249.9	0.7 ~ 0.9
特大暴雨	> 250	> 0.9

## 4 空间概率问题

因为小流域内不同的地形条件、承载体类型各异,风险的程度不同,发生灾害的概率也有所差异。所以,统计小流域滑坡泥石流发生时间概率后,还应该根据风险区划等级划分结果<sup>[1]</sup>,如:高风险区、较高风险区、中等风险区、较低风险区和低风险区(一般不发生滑坡泥石流灾害,可不统计),按不同的风险等级区域空间统计滑坡泥石流的发生概率,分析不同空间区域的概率特点。这种概率就称为风险区空间概率。

### 4.1 高风险区概率

以高风险区的银洞子沟泥石流和红色干沟泥石流两处灾害点为典型代表,根据这两处灾害发生的时间,获得白沙河小流域高风险区降雨量分布数据(表4)。

根据高风险区滑坡泥石流当日降雨量数据,利用式(2)建立当日降雨量条件下发生滑坡泥石流概率模型,即:

$$p = \frac{\exp(-2.789 + 0.065R_0)}{1 + \exp(-2.789 + 0.065R_0)} \quad (5)$$

由此获得到白沙河小流域高风险区滑坡泥石流当日降雨量与灾害发生概率的分布图(图2)。结果表明,当日降雨量达到40~50 mm时,高风险区灾害发生概率为0.5,当日降雨量达到60 mm时,灾害发生概率大于0.75(表5)。

表 4 高风险区发生滑坡泥石流降雨量

时间	当日降雨量	前第 1 d 累 计降雨量	前第 2 d 累 计降雨量	前第 3 d 累 计降雨量	前第 4 d 累 计降雨量	前第 5 d 累 计降雨量	前第 6 d 累 计降雨量	前 6 d 有 效降雨量
	$R_0/\text{mm}$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$R_3/\text{mm}$	$R_4/\text{mm}$	$R_5/\text{mm}$	$R_6/\text{mm}$	$R'/\text{mm}$
2009. 07. 17	31. 7	15. 1	2. 4	4. 1	0	0. 6	0	17. 1
2010. 08. 18	16. 2	1. 8	0	0	51. 4	40. 5	15. 6	49. 5
2011. 08. 15	99. 6	6. 8	0. 2	0	0	0. 1	2. 1	6. 6
2011. 08. 16	28. 6	99. 6	6. 8	0. 2	0	0	0. 1	88. 6
2011. 08. 20	37. 1	0. 3	6. 6	20. 4	2. 6	28. 6	99. 6	65. 2
2011. 09. 05	77. 7	0	1. 5	12. 1	0	0	0	8. 2
2012. 08. 17	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	0	15. 8
2012. 08. 18	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	30. 0
2012. 08. 19	43. 9	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	121. 3
2013. 07. 08	18	3. 2	0. 1	0. 1	49. 8	5. 6	3. 9	31. 3
2013. 07. 09	423. 8	18	3. 2	0. 1	0. 1	49. 8	5. 6	40. 3
2013. 07. 13	35. 9	71. 8	199. 3	423. 8	18	3. 2	0. 1	462. 5
2013. 07. 25	85	0	0	6. 6	1. 1	0	0	4. 5
2013. 07. 29	39. 1	36. 9	59. 2	11. 9	85	0	0	122. 1

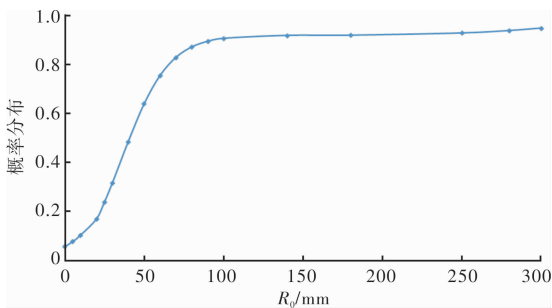


图 2 高风险区当日降雨量诱发灾害概率分布图

表 5 高风险区当日降雨诱发灾害概率统计表

雨量等级	当日降雨量/mm	灾害发生概率
小雨	<10	<0. 11
中雨	10 ~ 24. 9	0. 11 ~ 0. 24
大雨	25 ~ 49. 9	0. 24 ~ 0. 61
暴雨	50 ~ 99. 9	0. 61 ~ 0. 91
大暴雨	100 ~ 249. 9	0. 91 ~ 0. 93
特大暴雨	>250	0. 93 ~ 1

利用式(2)建立较高风险区滑坡泥石流与当日降雨量概率统计模型, 即:

$$P = \frac{\exp(-2.699 + 0.052R_0)}{1 + \exp(-2.699 + 0.052R_0)} \quad (6)$$

由此获得较高风险区滑坡泥石流当日降雨量与灾害发生概率的分布图(图 3)。图中表明, 当日降雨量达到 50 mm 时, 灾害发生的概率约为 0. 5, 当日降雨量达到 75 mm 时, 灾害发生的概率大于 0. 75(表 7)。

4. 2 较高风险区概率

较高风险包括上坪西村泥石流、观凤沟泥石流、高原村 4 组老干沟泥石流、大干沟泥石流和深溪沟泥石流。依据这 5 处灾害点发生的时间, 获得白沙河小流域较高风险区滑坡泥石流降雨量分布数据(表 6)。

表 6 白沙河流域较高风险区发生滑坡泥石流降雨量

时间	当日降雨量	前第 1 d 累 计降雨量	前第 2 d 累 计降雨量	前第 3 d 累 计降雨量	前第 4 d 累 计降雨量	前第 5 d 累 计降雨量	前第 6 d 累 计降雨量	前 6 d 有 效降雨量
	$R_0/\text{mm}$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$R_3/\text{mm}$	$R_4/\text{mm}$	$R_5/\text{mm}$	$R_6/\text{mm}$	$R'/\text{mm}$
2010. 08. 18	16. 2	1. 8	0	0	51. 4	40. 5	15. 6	49. 5
2010. 09. 07	42. 6	3. 1	19. 6	15. 5	31. 2	0. 6	10. 8	45. 2
2011. 07. 05	34. 4	4. 3	78. 8	12. 7	2. 1	93. 5	0. 7	107. 1
2012. 05. 01	39. 5	0. 2	4. 4	1. 2	0	0	3. 4	5. 2
2012. 05. 11	44. 1	0	4. 3	0	0	0. 2	0	3. 1
2012. 07. 27	40. 8	6. 9	0	0. 1	6. 7	8. 1	21. 1	20. 0
2012. 08. 17	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	0	15. 8
2012. 08. 18	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	0. 3	30. 0
2012. 08. 19	43. 9	114. 5	19. 9	0	0	20. 2	7. 5	121. 3
2012. 09. 15	53. 4	10. 1	0	0	3. 6	0	15. 2	15. 6
2013. 07. 09	423. 8	18	3. 2	0. 1	0. 1	49. 8	5. 6	40. 3

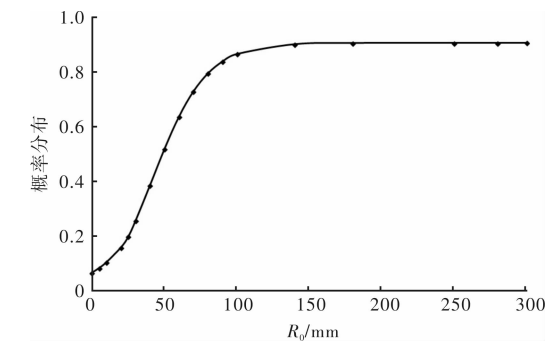


图3 较高风险区当日降雨量诱发灾害概率分布图

4.3 中等风险区概率

中等风险区仅有锅圈岩泥石流属于中等风险区。依据锅圈岩泥石流灾害点发生的时间，获得白沙河流域中等风险区滑坡泥石流降雨量分布数

表8 白沙河流域中等风险区发生滑坡泥石流降雨量

时间	当日降雨量 $R_0/\text{mm}$	前第1d累 计降雨量 $R_1/\text{mm}$	前第2d累 计降雨量 $R_2/\text{mm}$	前第3d累 计降雨量 $R_3/\text{mm}$	前第4d累 计降雨量 $R_4/\text{mm}$	前第5d累 计降雨量 $R_5/\text{mm}$	前第6d累 计降雨量 $R_6/\text{mm}$	前6d有 效降雨量 $R'/\text{mm}$
2009.07.17	31.7	15.1	2.4	4.1	0	0.6	0	17.1
2010.08.13	40.5	15.6	0	0	59.7	23.4	1.2	53.0
2010.08.14	51.4	40.5	15.6	0	0	59.7	23.4	78.2
2010.08.18	16.2	1.8	0	0	51.4	40.5	15.6	49.5
2010.08.19	159.6	16.2	1.8	0	0	51.4	40.5	50.6
2010.09.07	42.6	3.1	19.6	15.5	31.2	0.6	10.8	45.2
2011.08.21	37.1	0.3	6.6	20.4	2.6	28.6	99.6	65.2
2013.07.13	35.9	71.8	199.3	423.8	18	3.2	0.1	462.5

由此得到白沙河流域中等风险区滑坡泥石流当日降雨量与灾害发生概率的分布图(图4)。图中表明,当日降雨量达到70 mm时,灾害发生的概率约为0.5,当日降雨量达到130 mm时,灾害发生的概率大于0.75(表9)。

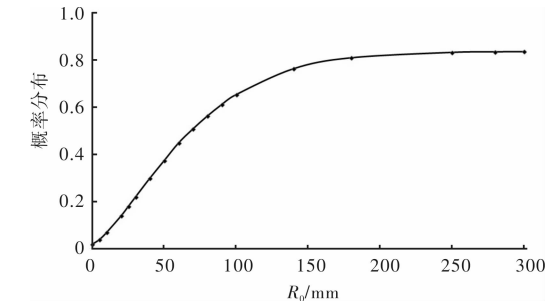


图4 中等风险区当日降雨量诱发灾害概率分布图

表10 白沙河流域较低风险区发生滑坡泥石流降雨量

时间	当日降雨量 $R_0/\text{mm}$	前第1d累 计降雨量 $R_1/\text{mm}$	前第2d累 计降雨量 $R_2/\text{mm}$	前第3d累 计降雨量 $R_3/\text{mm}$	前第4d累 计降雨量 $R_4/\text{mm}$	前第5d累 计降雨量 $R_5/\text{mm}$	前第6d累 计降雨量 $R_6/\text{mm}$	前6d有 效降雨量 $R'/\text{mm}$
2009.07.17	31.7	15.1	2.4	4.1	0	0.6	0	17.1
2010.08.18	16.2	1.8	0	0	51.4	40.5	15.6	49.5
2011.08.21	37.1	0.3	6.6	20.4	2.6	28.6	99.6	65.2
2012.08.18	114.5	19.9	0	0	20.2	7.5	0.3	30.0
2012.08.19	43.9	114.5	19.9	0	0	20.2	7.5	121.3
2013.07.09	423.8	18	3.2	0.1	0.1	49.8	5.6	40.3
2013.07.13	35.9	71.8	199.3	423.8	18	3.2	0.1	462.5
2013.07.25	85	0	0	6.6	1.1	0	0	4.5

据(表8)。

表7 较高风险区当日降雨诱发灾害概率统计表

雨量等级	当日降雨量/mm	灾害发生概率
小雨	<10	<0.10
中雨	10~24.9	0.10~0.20
大雨	25~49.9	0.20~0.52
暴雨	50~99.9	0.52~0.86
大暴雨	100~249.9	0.86~0.90
特大暴雨	>250	0.90~0.92

利用式(2)建立中等风险区滑坡泥石流与当日降雨量概率统计模型,即:

$$P = \frac{\exp(-1.907 + 0.025R_0)}{1 + \exp(-1.907 + 0.025R_0)} \quad (7)$$

4.4 较低风险区概率

较低风险区的滴水岩滑坡崩塌、峰子坨滑坡崩塌、丁木树沟泥石流、泡桐槽泥石流和甜竹坪滑坡属于较低风险区。依据灾害点发生的时间,获得白沙河流域较低风险区滑坡、泥石流降雨量分布数据(表10)。

表9 中等风险区当日降雨诱发灾害概率统计表

雨量等级	当日降雨量/mm	发生概率
小雨	<10	<0.07
中雨	10~24.9	0.07~0.18
大雨	25~49.9	0.18~0.38
暴雨	50~99.9	0.38~0.66
大暴雨	100~249.9	0.66~0.80
特大暴雨	>250	0.80~0.84

利用式(2)建立较低风险区滑坡泥石流与当日降雨量概率统计模型, 即:

$$P = \frac{\exp(-1.747 + 0.011R_0)}{1 + \exp(-1.747 + 0.011R_0)} \quad (8)$$

由此得到白沙河流域较低风险区滑坡泥石流当日降雨量与灾害发生概率的分布图(图 5)。图中表明, 当日降雨量达到 100 mm 时, 灾害发生的概率约为 0.5(表 11)。

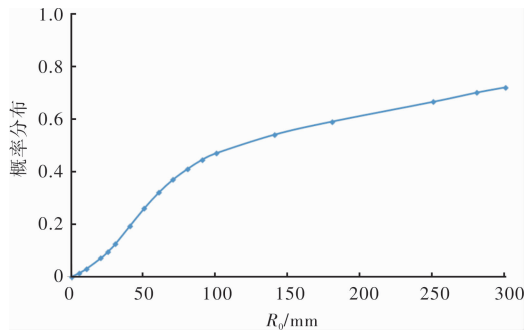


图 5 较低风险区当日降雨量诱发灾害概率分布图

表 11 较低风险区当日降雨诱发灾害概率统计表

雨量等级	当日降雨量/mm	发生概率
小雨	< 10	< 0.03
中雨	10 ~ 24.9	0.03 ~ 0.10
大雨	25 ~ 49.9	0.10 ~ 0.26
暴雨	50 ~ 99.9	0.26 ~ 0.47
大暴雨	100 ~ 249.9	0.47 ~ 0.67
特大暴雨	> 250	0.67 ~ 0.72

#### 4.5 全流域空间概率统计分析

参照图 2 ~ 图 5 所示的结果, 建立全流域高风险区、较高风险区、中等风险区和较低风险区 4 个区域(空间)与当日(时间)降雨量诱发灾害发生的概率关系(图 6), 可见高风险区和较高风险区的滑坡泥石流发生概率明显大于其他风险区, 并且随风险区的等级减小, 滑坡泥石流的发生概率降低。高风险区的滑坡泥石流发生的概率与较高风险区较为接近。

流域内在小雨条件下, 只有高风险区滑坡泥石流发生概率大于 0.1, 其他风险区滑坡泥石流发生概率都小于 0.1。在中雨条件下, 高风险区滑坡泥石流发生概率为 0.11 ~ 0.24, 大于其他风险等级区的滑坡泥石流概率。在大雨条件下, 高风险

区、较高风险区、中等风险区与较低风险区滑坡泥石流发生最大概率分别为 0.61、0.52、0.38 和 0.26。在暴雨条件下, 高风险区、较高风险区滑坡泥石流发生最大概率大于 0.80。在特大暴雨条件下, 高风险区、较高风险区和较高风险区滑坡泥石流发生最大概率大于 0.80(表 12)。

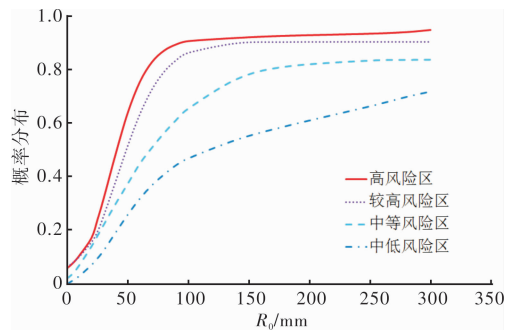


图 6 当日降雨条件下白沙河全流域不同风险区滑坡泥石流概率分布图

## 5 结语

(1)地震扰动区小流域滑坡泥石流风险与其他区域风险相同, 都应该包括风险的概率问题。发生滑坡泥石流概率越大, 意味着风险的存在可能性越高, 反之亦然。因此进行风险评估时, 必须回答评估区风险概率的类型和大小。

(2)白沙河小流域滑坡泥石流风险概率包括时间概率和空间概率两种类型。其中时间概率主要与当日降雨量相关, 当日降雨量达到暴雨时存在发生滑坡泥石流风险概率。当日降雨量达到或超过大暴雨和特大暴雨时, 滑坡泥石流风险概率迅速提高。空间概率因风险等级区域而异, 高、较高风险区滑坡泥石流受临界降雨量控制, 发生风险损失的概率最高。

(3)白沙河小流域可能出现滑坡泥石流风险损失的临界降雨量为大暴雨。降雨量达到大暴雨时, 风险概率曲线基本稳定在 0.9 水平。建议采用大暴雨作为风险预警临界指标。

(4)研究区的地震滑坡泥石流应具有衰减性。随时间推移, 发生频率和规模都将逐渐衰减, 因

表 12 当日降雨条件下白沙河全流域不同风险区诱发灾害概率汇总表

雨量等级	当日降雨量/mm	发生概率			
		高风险区	较高风险区	中等风险区	较低风险区
小雨	< 10	< 0.11	< 0.10	< 0.07	< 0.03
中雨	10 ~ 24.9	0.11 ~ 0.24	0.10 ~ 0.20	0.07 ~ 0.18	0.03 ~ 0.10
大雨	25 ~ 49.9	0.24 ~ 0.61	0.20 ~ 0.52	0.18 ~ 0.38	0.10 ~ 0.26
暴雨	50 ~ 99.9	0.61 ~ 0.91	0.52 ~ 0.86	0.38 ~ 0.66	0.26 ~ 0.47
大暴雨	100 ~ 249.9	0.91 ~ 0.93	0.86 ~ 0.90	0.66 ~ 0.80	0.47 ~ 0.67
特大暴雨	> 250	0.93 ~ 1	0.90 ~ 0.92	0.80 ~ 0.84	0.67 ~ 0.72

此风险概率也应该出现变化。此类问题还应该通过长期观测, 积累有价值的资料数据进一步研究, 得出科学结论。

## 参考文献:

- [1] 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, 2010, 28(3): 341–349.
- [2] 乔建平, 王萌, 石莉莉. 区域滑坡风险评估中的风险区划与概率分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 51–56.
- [3] 侯圣山, 李昂, 周平根. 四川雅安市雨城区地质灾害预警系统研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 160–165.
- [4] 彭贵芬, 刘盈曦. 基于模糊信息概率区间数的突发地质灾害降水因子评价研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 1–4.
- [5] 万石云, 赵宁坤, 段玮. 云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 45–50.
- [6] 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.
- [7] Xu W B, Jing S C, Yu W J, et al. A comparison between Bayes discriminant analysis and logistic regression for prediction of debris flow in southwest Sichuan, China [J]. Geomorphology, 2013, 201: 45–51.
- [8] Nikolopoulos I E, Crema S A B, Marchi L, et al. Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence [J]. Geomorphology, 2014, 221: 286–297.
- [9] Chang Ming, Tang Chuan, Zhang Dandan, et al. Debris flow susceptibility assessment using a probabilistic approach: A case study in the longchi area, Sichuan province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 1001–1014.
- [10] 乔建平, 杨宗佑, 田宏岭. 降雨滑坡预警的概率分析方法[J]. 工程地质学报, 2009, 17(3): 43–348.
- [12] Glade T. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using empirical antecedent daily rainfall model [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157: 1059–1079.
- [13] Glade T. Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of new zealand the soil water status model [J]. Zeitschrift fur Geomorphologie N E, 2000, 122: 63–84.
- [14] Guidicini G. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment [J]. Bulletin of IAEC, 1997, 16: 13–20.
- [15] Saito H. Relationship Between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity duration thresholds in Japan [J]. Geomorphology, 2010, 118: 167–175.
- [16] Finlay P J. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall [J]. Canadian geotechnical, 1997, 34(6): 811–824.
- [17] 谢守益, 张年学, 许兵. 长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J]. 工程地质学报, 1995, 3(2): 60–69.
- [18] 陈剑, 杨志法, 李晓. 三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3052–3056.
- [19] 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.
- [20] 陈丽霞, 殷坤龙, 刘长春. 降雨重现期及其用于滑坡概率分析的探讨[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 745–750.
- [21] 乔建平, 王萌, 吴彩燕. 汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 1–5.
- [22] 乔建平, 王萌. 滑坡风险分类及层次链[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 84–90.

## Study on Geological Hazards of Small Watershed Risk Probability in Wenchuan Earthquake Disturbance Area

XUE Zhihang<sup>1</sup>, DENG Chuang<sup>2</sup>, FAN Xiaoyi<sup>3</sup>, QIAO Jianping<sup>4</sup>, WANG Meng<sup>4</sup>, WU Caiyan<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

2. Power Emergency Center of State Grid Power Company of Sichuan Province, Chengdu 610000, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 62010, China; 4. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The characteristics of geological hazards in Wenchuan earthquake disturbance area are numerous landslides and rock falls, rich debris flow materials, and high occurrence frequency of hazards. We selected Dujiangyan City as the study area. Based on small watershed risk zonation, logistic regression model was adopted to make a statistics analysis on critical rainfall and time probability aiming at landslides and debris flows of small watershed after earthquake and them in different grade risk zones. The study results showed that intraday rainfall was the time condition to trigger landslide and debris flow with probability of 0.7 to 0.9. Heavy rainfall was spatial condition to trigger landslide and debris flow in higher and high risk areas with occurrence probability of 0.9. Critical rainfall to make risk loss was heavy rainfall.

**Key words:** Wenchuan earthquake; small watershed; hazard; critical rainfall; probability