

文章编号: 1008-2786-(2008)5-583-07

强降水诱发山体滑坡预报

马 力^{1, 2}, 游扬声², 缪启龙¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 重庆市气象局 重庆 410047)

摘 要: 山体滑坡是山地灾害的一种, 在诱发滑坡的众多自然因素中, 强降水是最主要的诱发因素之一。通过对重庆 1 615 个滑坡个例与其发生前 10 d 降水量值做统计分析, 揭示了降水量、滑坡发生时间、滑坡发生概率三者之间的关系, 由此给出了诱发滑坡的有效降水量定义、计算思路和计算公式, 并依此建立了强降水诱发的滑坡预报模型。所揭示出的降水权重系数变化规律, 从滑坡单单位移资料中得到了进一步验证。这个规律还有助于进行强降水诱发滑坡作用机理研究。

关键词: 滑坡; 预报; 降雨量; 有效降水量

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

强降水诱发的滑坡在世界上分布最广, 发生频率最高, 造成的危害最大。强降水诱发滑坡预报的核心是通过研究降雨与滑坡的各种关系, 预报可能的滑坡状态。其研究方法可分为: 统计方法、理论模型方法和统计学与理论模型的结合方法, 它们分别用于个体滑动可能性预报和区域滑坡可能性预报上。本文给出的模型属于考虑了一定物理意义的统计预报模型。

降水诱发滑坡是通过雨水下渗到滑动面, 对滑坡体产生加载、润滑等一系列作用而产生的, 而这些都需要时间, 因此, 有相当数量的滑坡并不是在大降水时马上发生的, 而是发生在大降水之后的数天之内。Lumb 指出^[1], 滑坡发生数量与 24 h 降雨量和前期 15 d 累计降雨量有关。在重庆也发现^[2], 滑坡的发生, 不仅与 24 h 降水量有关, 还与 10 d 累计降水量有关, 并且已以这两个要素为预报因子, 建立了滑坡气象预报模型(表 1)。

但是, 滑坡前 10 d 中每天的降水量对这次滑坡

的贡献是不同的, 越接近滑坡时间的降水量对这次滑坡贡献越大, 而越远离滑坡时间的降水量对这次滑坡的贡献越小, 直至消失。那么, 滑坡前 10 d 每天的降水量对这次滑坡的贡献率(或降水权重系数)和距离滑坡发生的时间究竟是怎样的关系? 本文采用重庆 1 615 个滑坡个例和其发生前 10 d 降水量值做统计分析研究, 得到了其计算公式。同时, 还用 2007 年汛期重庆北碚区醪糟坪滑坡体位移和对应时段的降水量资料对此公式进行了验证, 得到了肯定的结论。在上述研究的基础上, 给出了一个具有一定物理意义的滑坡宏观统计预报模型。

1 资料来源和处理方法

1. 本文所用滑坡资料来源于重庆市地质环境监测总站调查得到的重庆境内 1980~2006 年的 1 615 个滑坡个例, 和上述单位提供的重庆地质灾害危险性分区成果。

收稿日期 (Received date): 2007-11-20; 改回日期 (Accepted): 2008-03-05.

作者简介 (Biography): 马力, 女, (1961-), 硕士, 研究员, 南京信息工程大学在读博士。多年从事气象业务和科研工作, 主持和参加的中国气象局、国家科技部资助的有关山体滑坡气象预报方面的研究课题获得了省部级科技进步二等奖。[Ma Li female, was born in Feb, 1961, master professor, was reading doctor in Nanjing university of information science and technology. Ma Li has engaged in meteorological service and the scientific research for many years. She managed the subject about the research of landslide weather forecast which was granted by China meteorological administration and the Ministry of Science and Technology of China, and won the second prize of advance in technology in Chongqing municipality.]

表 1 综合考虑 24 h 降水量和滑坡前 10 d 累计降水得到的滑坡可能性判别指标 (单位: mm)

Table 1 Landslide possibility of discrimination indicators were obtained by Comprehensive consider 24 hours rainfall and landslides 10 days before cumulative rainfall(mm)

ΣR_{24}	R_{24}				
	(0, 10)	[10, 25)	[25, 50)	[50, 100)	[100, ...)
	小于中雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
(0, 20)	1 级	1 级	1 级	1 级	1 级
[20, 50)	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
[50, 100)	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
[100, 200)	1 级	2 级	4 级	4 级	5 级
[200, 300)	1 级	2 级	5 级	5 级	5 级
[300, ...)	1 级	2 级	5 级	5 级	5 级

注: (1)表中 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级分别对应滑坡概率为 [0, 10%)、[10%, 25%)、[25%, 50%)、[50%, 75%)、[75%, 95%) , 其预报用语为: 1 级是山体滑坡的可能性很小, 2 级是山体滑坡的可能性较小, 3 级是山体滑坡的可能性较大, 4 级是山体滑坡的可能性大, 5 级是山体滑坡的可能性很大。(2)表中横向 (R_{24}) 表示 24 h 降水量的大小, 纵向 (ΣR_{24}) 表示滑坡之前 (含滑坡当天) 10 d 累计降水量。

2. 降水量资料由重庆市气象局气象观测站网观测得到。
3. 资料处理和计算方法主要采用统计方法, 函数拟合采用的是 Advanced Grapher version2. 1 软件。
4. 2007 年汛期重庆北碚区醪糟坪滑坡体位移资料的获取:

(1)监测仪器: 利用重庆市已建立的 GPS 基准站资料, 再加上一台双频 GPS 接收机, 根据监测内容与监测规范, 结合测量的要求, 进行差分定位, 对醪糟坪新滑坡体位移进行监测, 监测原理如图 1 所示。因为 GPS 测量误差是强相关的, 使用载波差分或同时使用载波差分及伪距差分则可将大部分测量误差消除, 定位误差精度可达毫米级。

(2)监测规范: 据 1997 年发布的《全球定位系

统城市测量技术规程》CJJ 73- 97 第 6. 1 条的规定, 选择双频载波相位式标称精度 $< 10\text{ mm} + 5^{\ast} 10^{-6} \ast D$ 的 GPS 接收机 (购买仪器标称精度为 $3 + 0. 5\text{ ppm}$, 高于规范要求)。按中华人民共和国国家标准《全球导航卫星系统 (GNSS) 第 1 部分: 全球定位系统 (GPS) 接收设备性能标准、测试方法和要求的测试结果》GB/T 18214. 1- 2000 的规定, 进行相关检验和测试。

(3)监测部位与测点布置: 根据醪糟坪新滑坡的特点及危害情况, 变形监测的重点是上段泥石流源区的稳定情况。在新滑坡上部布设 3 个变形监测点; 在中下部布设一个变形监测点。根据这 4 个测点的位移情况, 能够了解该滑坡的发育规律。为了获得毫米级的监测精度, 标志顶部安装双频 GPS 测量型接收机的强制对中设备。

(4)监测频率与数据处理: 自 2007- 05 中旬 (雨季或者汛期到来前) 开始, 每天监测一次。每天编制 GPS 卫星可见性预报表, 根据该表进行观测时段设计, 编制作业计划进度表。因为采用随机软件和广播星历, 平面位移和垂直位移的监测精度只能达到亚厘米级, 采用精密星历和 GAM II 等软件, 平面位移和垂直位移的监测精度均能达到毫米级。北碚气象局设的 GPS 监测站与醪糟坪滑坡直线距离大约 2 km, 根据已建重庆市 GPS 基准网点与醪糟坪滑坡的图形结构及距离情况, 执行 1998- 07- 05 发布的中华人民共和国国家标准《差分全球定位系统 (DGPS) 技术要求》GB/T 17424- 1998 的相关规定,

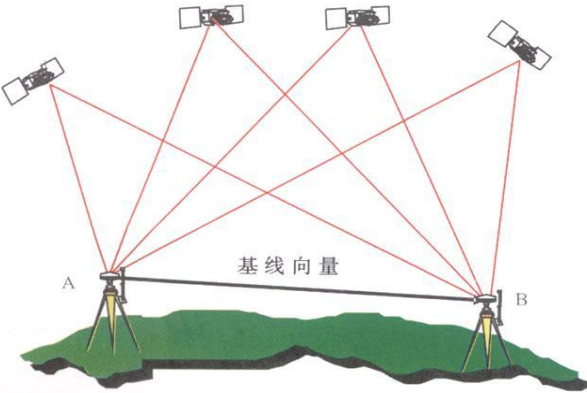


图 1 GPS 测量原理

Fig 1 Measuring principle of GPS

采用最合理的解算方案, 完全可以进行差分定位。因为变形监测主要考虑的是滑坡体位移量, 对于测点的绝对位置的精度要求不高, 采用相对定位技术, 数据处理时采用 GPS系统的 WGS- 84 坐标系统, 不进行约束平差, 以获得更高的变形量监测精度。

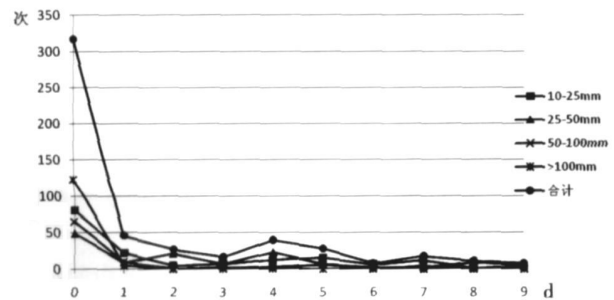
2 降水权重系数

表 2是通过对重庆境内 1980~ 2006年发生的 1 615个滑坡个例统计得到的滑坡时间、降水量、滑坡发生次数三者之间的关系, 表 2的列是诱发滑坡的降水量 (mm), 行是强降水发生时间, 即在滑坡当天还是前几天 (单位: d), 表内填入的是滑坡次数或频率 (最右边一列是频率, 其余是次数)。由表 2最右边一列可以看出, 有 61% 的滑坡都发生在有大于 10 mm 的降水的当天, 有 75% 的滑坡发生在较大降水发生后的 3 d以内, 随着时间后延, 滑坡发生次数

迅速递减。从表 2和图 2还可看出三点: 1. 当日降水量 0~ 10 mm 时, 很少发生滑坡; 日降水量大于 25 mm 时, 随着日降水量的增大, 发生滑坡的频数迅速增加; 日降水量在 10~ 25 mm 时, 滑坡仍较多, 在数量上超过日降水量 20~ 50 mm 和 50~ 100 mm 时发生的滑坡, 这是因为日降水量 10~ 25 mm 的降水在重庆发生的次数最多。2. 24 h降水量越大, 滑坡发生时间越接近强降水发生的时间, 当 24 d雨量 ≥ 100 mm (大暴雨) 时, 当日发生山体滑坡频数是日降水量 25~ 50 mm 时的 2.5 倍, 是 50~ 100 mm 时的 1.9 倍, 几乎所有滑坡都发生在暴雨的当天或第二天。这不仅说明了滑坡与强降水的关系十分密切, 也说明了强降水会使得滑坡发生的突发性增强。3. 表 2揭示出的规律表明, 降水强度越大, 造成的动、静水压力越大, 水的下渗速度越快, 从而引起滑坡也就越快。而在降水强度较小时, 上述过程都要缓慢一些, 所以坡体变形反应也慢。

表 2 滑坡时间、降水量、滑坡发生次数三者之间的关系
Table 2 The relationship between landslide time and rainfall

强降水发生时间	日降水量				合计	频数
	10~ 25 mm	25~ 50 mm	50~ 100 mm	> 100 mm		
滑坡当天	81	49	65	122	317	61%
滑坡前 1 d	22	9	10	5	46	8.80%
滑坡前 2 d	5	21	1	0	27	5.20%
滑坡前 3 d	7	7	2	1	17	3.30%
滑坡前 4 d	13	23	3	1	40	7.70%
滑坡前 5 d	15	7	6	0	28	5.40%
滑坡前 6 d	6	2	0	0	8	1.50%
滑坡前 7 d	12	2	4	0	18	3.50%
滑坡前 8 d	1	9	1	0	11	2.10%
滑坡前 9 d	3	5	0	0	8	1.50%



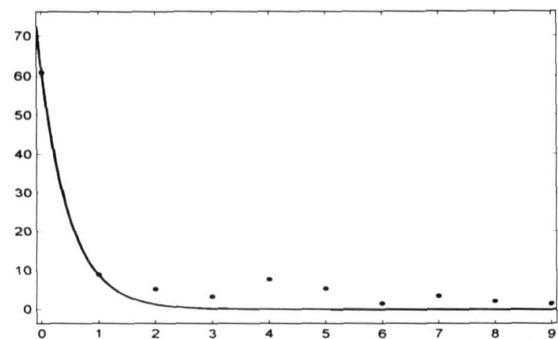
注: 合计是 10~ 25 mm、25~ 50 mm、50~ 100 mm、100 mm 的总和

图 2 滑坡时间、降水量、滑坡发生次数三者之间的关系

我们定义图 2所反映出的变化, 是每一天的降水量对这次滑坡的贡献率, 或降水权重系数。从表 2和图 2看出, 每一条变化曲线都应该可以用一元负指数函数进行拟合。但若要用一个函数即反映降水权重系数随天的变化, 又反映出它随降水量的变化, 就只有用一个二元函数拟合。我们采用 Advanced Grapher version2. 1软件对表 1最右边一列数据进行函数拟合, 得到下式

$$(x\alpha) = 60.96\exp(-1.93 \times x) / 100 \quad (1)$$

式中 x 为滑坡发生前第几天, 如滑坡当天, $x = 0$



注: 图中横坐标是滑坡当天(0)、滑坡前 1 d(1)、滑坡前 2 d(2)……, 纵坐标是滑坡发生概率(%)

图 3 对山体滑坡时间与降水量关系的函数拟合

Fig. 3 The relationship between landslide time and rainfall

滑坡前 1 d $x = 1$ $\alpha(x)$ 是滑坡前第 x 天的降水权重系数。

图 3 中的光滑曲线是式 (1) 的拟合函数曲线, 图中的点子是实际资料统计得出的 (即表 2 最右边一列数据), 可以看出, 其拟合效果很好, 拟合率达到 99%。从图中还可看出, 每天的降水量对滑坡的贡献率 (权重系数) 在滑坡前 2 d 以前, 随着远离滑坡发生时间而迅速下降, 是一个衰减迅速的指数函数, 而在其以后变化就非常小了, 这说明此后各天的降水量不仅贡献率低, 而且贡献率的变化也很小。

对于表 2 图 2 整体情况需要用二元函数拟合, 经拟合出的函数如下

$$\alpha(x_1, x_2) = [(301.7e^{-0.109x_2} + 22.53e^{0.048x_2}) e^{(-0.00006414x_2^2 + 0.193 - 0.8989)x_1}] / 100 \quad (2)$$

式中 x_1 、 x_2 分别是滑坡发生前第几天 (如滑坡当天, $x_1 = 0$ 滑坡前 1 d, $x_1 = 1$) 和降水量 (如 $x_2 = 50$ mm), 而 $\alpha(x_1, x_2)$ 是在特定的 x_1 、 x_2 下滑坡发生的概率。此公式的拟合率达到 92.78%。式 (2) 表明了日降水量、滑坡发生时间、降水权重系数三者的关系。不仅表现了降水权重系数随时间衰减的规律, 还可以表现出日降水量不同时, 降水权重系数随时间衰减状况。

由于式 (1) 和 (2) 实际上反映的是不同强度的降水下渗到滑坡体敏感部位诱发滑坡与时间的关系, 所以, 揭示出的降水权重系数变化规律有助于进行强降水诱发滑坡作用机理研究。

3 有效降水计算公式

续降水时各日的降水量对滑坡有着不同大小的影响。本文提出滑坡有效降水量的概念, 即滑坡有效降水量考虑了滑坡之前各日的降水量对本次滑坡贡献的累积降水量。显然离滑坡发生时间越近的降水量对本次滑坡的贡献率越大。其计算公式应是滑坡之前各天降水量对本次滑坡的贡献率乘以其对应时间的日降水量的总和。由式 (1)、式 (2) 和下式可以计算滑坡有效降水量。式中 R' 为滑坡有效降水量, R_x 为滑坡前第 x 天的降水量, 如, $x = 0$ R_x 就是滑坡当天的降水量, $x = 1$ R_x 就是滑坡前 1 d 的降水量, $\alpha(x)$ 和 $\alpha(x_1x_2)$ 是式 (1)、式 (2) 所给出的滑坡当天和滑坡前各天的降水权重系数

$$R' = \sum_x R_x \alpha(x) \quad (3)$$

$$R' = \sum_x R_x \alpha(x_1, x_2) \quad (4)$$

式 (4) 是即考虑了降水量大小, 又考虑了滑坡前每一天降水的权重系数时, 计算滑坡有效降水的公式。它一般用于样本资料比较丰富的情况下, 而式 (3) 只考虑了滑坡前每一天降水的权重系数时, 计算滑坡有效降水的公式。

表 3 给出的是 1994-07-11 发生在重庆的一次滑坡个例计算有效降水量的例子。表中第二列是滑坡当天、滑坡前 1 d 滑坡前 2 d……的日降水量, 第三列是由 (3) 式算出的每天的降水量对这次滑坡的贡献率 (权重系数), 第四列是降水量与降水权重系数之积, 其最后一行的累计值就是有效降水量。可以看出, 它与 10 d 降水量的合计值 (第二列最后一行) 的差别还是相当大的。

表 3 一个计算有效降水的个例

Table 3 A Case of of the effective precipitation calculation

强降水发生时间	日降水量 (mm) R_x	降水权重系数 ($\alpha(x)$) %	$R_x \alpha(x)$
滑坡当天 ($x = 0$)	124	60.96	75.59
滑坡前 1 d ($x = 1$)	1.2	8.85	0.106
滑坡前 2 d ($x = 2$)	7.9	1.28	0.101
滑坡前 3 d ($x = 3$)	10.8	0.186	0.0201
滑坡前 4 d ($x = 4$)	1.2	0.0271	3.25×10^{-4}
滑坡前 5 d ($x = 5$)	0	3.93×10^{-3}	0
滑坡前 6 d ($x = 6$)	0	5.7×10^{-4}	0
滑坡前 7 d ($x = 7$)	0	8.27×10^{-5}	0
滑坡前 8 d ($x = 8$)	37.8	1.2×10^{-5}	4.54×10^{-6}
滑坡前 9 d ($x = 9$)	0	1.74×10^{-6}	0
Σ	182.9		75.82

强降水不仅对当日滑坡有显著影响, 而且在连

4 滑坡体位移量与降水量的关系

利用本文开始介绍的观测方法, 得到了 2007 年汛期重庆北碚区醪糟坪滑坡体 31 个样本的位移资料 (表 4 单位: mm /d), 同时还得到了相应时间段的每日降水量资料 (20: 00~ 20: 00 单位: 0. 1 mm)。试图用统计方法对降水量和位移量之间的关系进行研究分析。

表 4 滑坡位移和降水量序列

Table 4 Landslide displacement and precipitation sequence

滑坡体位移量 (mm)	逐日降水量 (mm)
0	4. 1
35. 6	0
266. 3	2. 8
1 297. 4	23. 4
1 444. 4	2. 6
1 271. 3	5. 5
1 801. 6	0
787. 6	0
914. 9	5. 2
594. 4	0
727. 5	1. 5
1 622. 5	17. 2
1 577. 0	2. 9
1707. 6	0
1 748. 3	0
1 863. 1	79. 3
1 502. 4	4. 7
1 342. 0	7. 5
965. 7	0
1 006. 6	0
487. 3	3. 8
508. 8	0
529. 3	0
105. 7	0. 5
81. 1	0
18. 9	0
29. 3	0
13. 0	0
8. 8	0
7. 1	0. 8
2. 2	4. 5

4. 1 每日降雨量与每日滑坡体位移量之间的同时对应关系

经统计分析, 发现逐日降水量与滑坡体位移量之间为正相关关系, 即当日降水量大时, 体滑坡体位移量也大, 其相关系数为 0. 392 4。这个相关系数虽然很低, 但它可以通过信度为 0. 05 的检验, 这说明滑坡体每天的位移量与当日的降水量似乎有一定的关系。

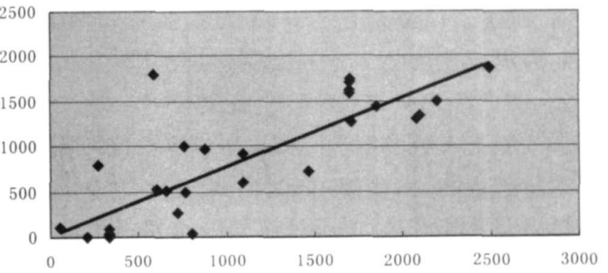
4. 2 10 d 累计降水量与滑坡体位移量的关系

分析各日的滑坡体位移量和其之前 (含当天) 10 d 累计降雨量的线性相关关系知, 它们之间为正相关, 即当 10 d 累计降雨量大时, 滑坡体位移量也大, 其相关系数为 0. 801 6。其线性相关方程是

$$D = 0. 7624(\sum R) + 16. 5 \tag{5}$$

式中 D 是每天的滑坡体位移量, $(\sum R)$ 是 10 d 累计降雨量。

它们的线性相关系数通过了信度为 0. 01 的检验。由图 4 可以看出, 其线性相关性还是比较好的, 与 5. 1 计算的逐日降水量与滑坡体位移量的相关情况相比较, 这个相关性要好的多, 这进一步证明了滑坡不仅与 24 h 降水量有关, 更重要的是, 与滑坡发生前期的累计降水量有关。



注: 图中横坐标是 10 d 累计降雨量 (mm), 纵坐标是各日滑坡体位移量 (mm)

图 4 10 d 累计降雨量与各日滑坡体位移量关系图
Fig 4 The relationship between 10 days total rainfall and landslide displacement of everyday

4. 3 滑坡有效降水量与坡体滑位移的关系

为了证实公式 (3) 对这种关系的改进效果, 统计了滑坡有效降雨量与滑坡体位移量的线性相关关系, 得知其相关系数达到 0. 86 超过了 10 d 累计降雨量与各日滑坡体位移量的相关系数, 这说明公式 (3) 对揭示降水与滑坡关系更具有优势。

其线性相关方程是

$$D = 0. 677R' + 170. 76 \tag{6}$$

式中 D 是每天的滑坡体位移量, R' 是滑坡有效降雨量

由图 5 可以看出, 其线性相关性还是相当好的, 这说明滑坡有效降雨量与滑坡的关系更加密切, 更加贴近大降水诱发滑坡的物理本质。因此, 在建立滑坡气象等级预报模型时, 我们选用滑坡有效降雨量作为预报因子。

这个结论对研究大降水诱发滑坡的机理是很有帮助的, 首先说明降水通过滑坡体上的裂缝渗透到滑动面需要一定的时间; 其二说明滑坡发生之前各天的降水对滑坡的影响不是等权重的, 越接近滑坡发生时间的降水对产生滑坡的影响越大; 其三是滑坡发生前期的累计降雨量 (特别是滑坡有效降雨量) 越大, 发生滑坡的可能性越大; 其四是降雨量越大, 滑坡的突发性越强。

5 强降水诱发滑坡预报模型

5.1 预报滑坡概率等级的确定

在重庆滑坡的实际预报中, 是进行等级的概率预报。文献 [2] 曾划分过 1~5 级, 现在由中国气象局和国土资源部的相关规定, 按滑坡发生概率大小划分为 4 级, 即 I、II 级对应滑坡发生概率小于 50%, II 级对应易滑坡发生概率为 50%~75%, IV 级对应滑坡发生概率大于 75%。

5.2 有效降雨量与滑坡发生概率

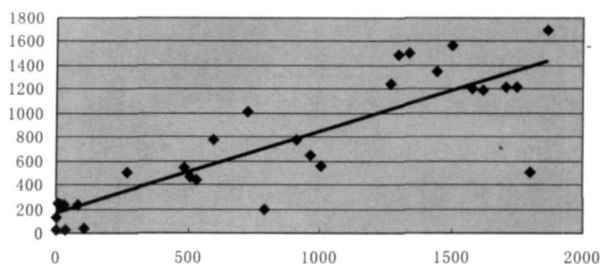
预测未来滑坡发生概率是用日降雨量计算有效降雨量进行的, 由前述可知, 由式 (3), 对重庆滑坡计算出有效降雨量, 再统计有效降雨量与滑坡的关系如图 6, 经函数拟合如式 (7)

$$P(R') = 1.348 \times 10^{-4} R'^3 - 0.0334 R'^2 + 2.73 R' + 6.2 \quad (7)$$

式中 $P(R')$ 是在有效降雨量为 R 的情况下, 滑坡发生的概率。图 6 中的光滑曲线是式 (7) 的函数曲线和实际资料拟合很好, 而图中的点子是根据实际资料计算得出的, 其拟合率达到 98.62%。从图 6 还可看出, 随着有效降雨量的增加, 滑坡发生概率在迅速增加, 当有效降雨量大于 10 mm 时, 滑坡的可能性就达到了 24.4%, 当有效降雨量达 120 mm 时, 滑坡发生概率达 85% 以上。

例如, 将表 3 个例的有效降雨量 75.8 mm 代入 (7) 式得到滑坡可能性达到 80.02%, 它已达到山体滑坡等级 IV 级, 属于最易发级, 此次滑坡实际上是发

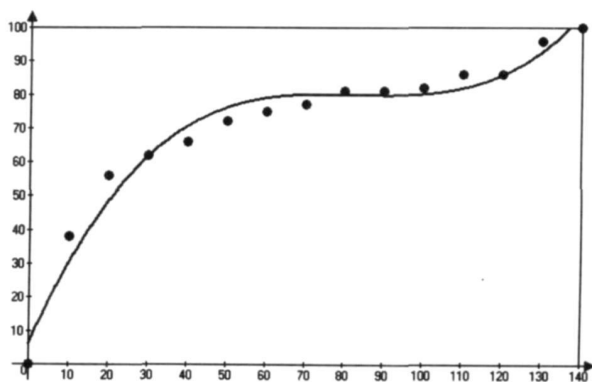
生了。



注: 图中横坐标是有效降水 (单位: 0.1 mm), 纵坐标是各日滑坡体位移量 (mm)

图 5 滑坡有效降雨量与滑坡体位移量的关系

Fig. 5 The relationship between landslide effective rainfall and landslide displacement



注: 图中横坐标是有效降水量 (mm), 纵坐标是滑坡发生概率 (%)

图 6 有效降水量与滑坡发生概率

Fig. 6 Effective precipitation and probability of landslide

6 结论

1. 通过对重庆 1 615 个滑坡个例与其发生前 10 d 降水量做统计分析, 给出了滑坡当天、滑坡前 1 d、滑坡前 2 d……的降水量对本次滑坡的贡献率 (降水权重系数) 统计思路和计算公式。此公式是一个衰减迅速的负指数函数, 它表现出有 60% 多的滑坡都发生在大的降水的当天, 有 75% 的滑坡发生在较大降水发生后的 3 d 以内, 随着时间后延, 滑坡发生次数迅速递减。同时给出了滑坡有效降雨量的定义和计算公式, 它是降水权重系数与降水量的乘积的和。

2. 经统计逐日降水量与滑坡体位移量的同时线性相关关系、各日的滑坡体位移量和其之前 (含当天) 10 d 累计降雨量的线性相关关系、滑坡有效

降雨量与滑坡体位移量的线性相关关系, 并进行比较知, 滑坡体位移量其线性相关性最好。这说明滑坡有效降水量与滑坡的关系更加密切, 更加贴近大降水诱发滑坡的物理本质。

3. 上述结论对研究大降水诱发滑坡的机理是很有帮助的, 首先说明降水通过滑坡体上的裂缝渗透到滑动面需要一定的时间; 其二说明滑坡发生之前各天的降水对滑坡的影响不是等权重的, 越接近滑坡发生时间的降水对产生滑坡的影响越大; 其三是滑坡发生前期的累计降水量 (特别是滑坡有效降水量) 越大, 发生滑坡的可能性越大; 其四是降水量越大, 滑坡的突发性越强; 其五是用滑坡有效降水量作为预报因子, 给出了一个强降水诱发滑坡的预报模型和建模思路。

参考文献 (References)

- [1] Wen Baoping. Landslide prediction on the research status and development trend [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(1~2): 86~91
[文宝萍. 滑坡预测预报研究现状与发展趋势 [J]. 地学前缘, 1996 3(1~2): 86~91]
- [2] Liao Daiqiang, Ma Li. The meteorological questions in landslide and mud-rock flow forecast [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2000, 28(1): 45~51 [廖代强, 马力. 滑坡 (泥石流) 预测预报

- 中的气象问题 [J], 气象科技, 2000, 28(1): 45~51]
- [3] Shan Jiusheng, Liu Xinfeng, Wei Li, et al. Rainfall characteristics analyses on landslide in Jiangxi province [J]. *Meteorology*, 2004, 30(1): 13~15 [单九生, 刘修奉, 魏丽, 等. 诱发江西滑坡的降水特征分析 [J]. 气象, 2004 30(1): 13~15]
- [4] Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkai, et al. Rainstorm Mud-rock Flow and Landslide in the Region Prediction and Forecasting [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994: 220~221 [谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994 220~221]
- [5] Zhou Guobing, Ma Li. Forecasting operation system of mountain coast's weather condition to Chongqing [J]. *Journal of Meteorological Applications*, 2003, 14(1): 123~124 [周国兵, 马力. 重庆市山体滑坡气象等级预报业务系统 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 123~124]
- [6] Zhou Guobing, Ma Li, Liao Daiqiang, et al. The research of landslide grade forecast in Chongqing [J]. *Meteorological Science*, 2005, 25(1): 105~108 [周国兵, 马力, 廖代强, 等. 重庆市山体滑坡等级预报研究 [J]. 气象科学, 2005 25(1): 105~108]
- [7] Zhao Huilin, Li Anong. Measuring the deformation of Xiaokou landslide by GPS [A]. In: Cui Peng, et al. Research on Mountain Disasters and Environmental Protection Across Taiwan Strait. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998: 476~480 [赵惠林, 李爱农. 利用 GPS 监测峡口滑坡变形 [A]. 见: 崔鹏等, 海峡两岸山地灾害与环境保育研究. 四川科学技术出版社, 1998 476~480]

The Research of Landslip Forecast Reduced by Strong Precipitation

MA Li^{1,2}, YOU Yangsheng², MAO Qilong¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 China;

2. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 410047 China)

Abstract Landslide is a geological disasters in the landslide induced by the many natural factors, heavy rainfall is one of the most important factors. After statistically analyzing the relationship of the 10 days total precipitation as the landslide occurring on 1 615 samples of Chongqing, it can be obtained the relationship of the rainfall, the time of the landslide taking place and the probability of the landslide taking place, which is given landslides induced by the effective precipitation definitions, calculation formula and ideas, and accordingly established a strong precipitation-induced landslides forecasting model. In this paper, It can be validate from the data of monomer landslide displacement, which reveals the precipitation changes of weight coefficient. The law also contribute to the strong precipitation-induced landslides on the mechanism.

Key words landslide; forecast; precipitation; effective precipitation