

# 基于地质灾害易发程度分区的滑坡预报模型

周国兵<sup>1</sup>, 马力<sup>2</sup>, 韩余<sup>1</sup>

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147; 2. 重庆市气象局, 重庆 401147)

**摘 要:** 利用 1980~2006 年重庆市山体滑坡个例, 根据重庆市国土资源局对重庆市地质灾害易发程度等级区划对滑坡个例进行了分类统计。结果表明, 降水对不同滑坡危险等级区域的影响是不同的, 越容易产生滑坡的区域其前期降水对其的潜在影响越大。根据前期不同量级降水诱发的滑坡发生概率, 拟合出了不同地质易发分区的前期降水对滑坡的贡献率指数方程和山体滑坡有效降水量方程, 在此基础上建立起了重庆市不同地质灾害易发程度灾害区内山体滑坡预报指标模型, 为开展重庆市精细化山体滑坡气象条件等级预报打下良好的基础。

**关键词:** 滑坡预报模型; 地质灾害; 易发程度分区

中图分类号: P642

文献标识码: A

重庆地处三峡库区, 属典型的亚热带季风气候, 降水丰沛, 地层以沙砾、泥岩分布最广。特殊的地理环境、地质构造和气候条件极易造成山体滑坡等地质灾害。重庆市国土局依据已有地质灾害调查资料, 结合地形地貌、岩土类型、地质构造、水文地质及人类经济活动等因素, 对重庆市地质灾害易发程度进行等级区划, 共分为四级: 高易发区、中易发区、低易发区和不易发区(图 1), 其中高易发区总面积 5 301. 13 km<sup>2</sup>, 占全市总面积的 6. 43%; 中易发区总面积 57 350. 81 km<sup>2</sup>, 占全市总面积的 69. 60%; 低易发区总面积为 19 012. 64 km<sup>2</sup>, 占全市总面积的 23. 08%; 不易发区总面积为 735. 42 km<sup>2</sup>, 占全市总面积的 0. 89%。重庆市地质灾害类型以滑坡、危岩崩塌、泥石流及地面塌陷等为主, 其中滑坡最为显著占有所有地质灾害的 90% 以上。

2001 年, 重庆市气象局在重庆市山体滑坡个例分析基础上率先在气象部门开展了山体滑坡气象条件等级预报研究, 建立起了 24 h 当日降水和 10 d 累计降水与山体滑坡之间的统计关系模型, 并开发出了业务系统开展业务预报<sup>[1, 2, 3]</sup>。由于原来的山体

滑坡气象条件等级预报的空间分辨率到县, 已经不能满足现在的精细化预报服务需要。为此, 我们进一步收集重庆市山体滑坡个例, 在全市地质灾害易发程度分区的基础上开展深入研究, 建立起了不同易发分区内的山体滑坡预报模型, 为开展精细化山体滑坡气象条件预报打下了良好的基础。

## 1 资料准备

为了深入研究重庆市山体滑坡气象条件等级预报模型, 我们收集了重庆市 1980~2006 年的重庆市所有山体滑坡个例, 共选取了既有具体日期又有具体地点的滑坡个例 3 216 个。借助 GIS 地理信息系统, 将重庆市地质灾害易发程度等级区划图数字化, 然后将滑坡个例进行分类统计, 其中高易滑区有 455 个个例, 中易滑区有 2 344 个个例, 低易滑区有 409 个个例, 不易滑区有 8 个个例。根据每个滑坡个例发生的时间, 收集了从滑坡当日开始 10 d 内的日降水资料。降水量资料选用的是距离滑坡体最近且最能代表滑坡体附近降水量的站点资料。

收稿日期 (Received date): 2008-08-05; 改回日期 (Accepted): 2009-01-11。

基金项目 (Foundation item): 中国气象局多轨道业务建设项目“西南地区滑坡和泥石流灾害气象监测预警业务服务系统”(2007) [Supported by the business building project of China Meteorological Administration 2007]

作者简介 (Biography): 周国兵 (1973-), 男 (汉), 重庆人, 博士生, 高级工程师, 多年从事气象业务与科研工作。[Zhou Guobing (1973-), Male born in Chongqing Ph.D., Senior Engineer has engaged in the meteorological service and the scientific research for many years E-mail: zhou-gb@163.com]

## 2 滑坡统计模型的建立

已有的研究成果表明, 山体滑坡不仅仅与降水有关, 还与地质结构类型和人类活动有关。由于本研究是在地质灾害易发程度等级区划图的基础上进行的, 而国土部门在开展地质灾害易发程度等级区划时已经考虑了地形地貌、岩土类型、地质构造、水文地质及人类经济活动等因素, 所以本研究不再重复考虑地质因素, 只考虑降水因素。

### 2.1 滑坡有效降水量引入

研究表明, 降水对山体滑坡的诱发作用, 不仅取决于当日雨量, 而且与前期过程降水量有关, 但前期各日雨量对该次滑坡的影响程度是不相同的。那么前期每一天的降水量的对滑坡的贡献到底有多大? 在过去研究中, 直接用当日降水量和累计降水量确定预报等级时存在一些缺陷, 比如在预报两次滑坡过程中当日降水量和累计降水量都相同的情况下, 从预报等级上应该是一样的, 但是如果是滑坡发生前一天降水量为 100 mm 和前 5 d 的降水为 100 mm 时, 他们对滑坡的实际影响作用显然是不一样的。因此, 为了进一步研究降水过程对致灾影响程度, 我

们引入“滑坡有效降水量”这一概念<sup>[4 5]</sup>。

滑坡有效降水量是指对当日山体滑坡发生时的临界降雨量, 其值等于前期各日降雨量与其影响系数乘积之和, 计算式为公式 (1)

$$R = \sum_{x=0}^n R_x a_x \quad (1)$$

式中  $R$  为滑坡有效降水量,  $R_x$  为每日降水量,  $a_x$  为影响系数,  $x$  为天数,  $x=0$  表示当天,  $x=1$  表示前一天, 以此类推。 $R_x$  为已知量, 只要能够确定出影响系数  $a_x$ , 就可以计算有效降水量  $R$ 。

### 2.2 模型建立思路

统计分析表明, 部分山体滑坡并不是在大降水之后马上发生的, 通过对重庆市 1980 年以来 3 216 个滑坡发生当日 24 h 降水量 > 10 mm 的山体滑坡个例统计得知, 有 58.4% 的滑坡发生在有 < 10 mm 的降水的当天, 随着时间后延, 滑坡发生次数迅速递减。为此, 根据不同地质灾害易滑程度分区分别统计了前期不同量级降水诱发的滑坡发生概率 (表 1)。

资料处理方法: 根据前期统计分析结果, 日降水 > 10 mm 就会对山体滑坡产生重要影响, 为此我们按 > 10 mm 降水量级针对不同易滑分区内的滑坡个例进行分类统计。从滑坡发生当日开始向前统计 10 d

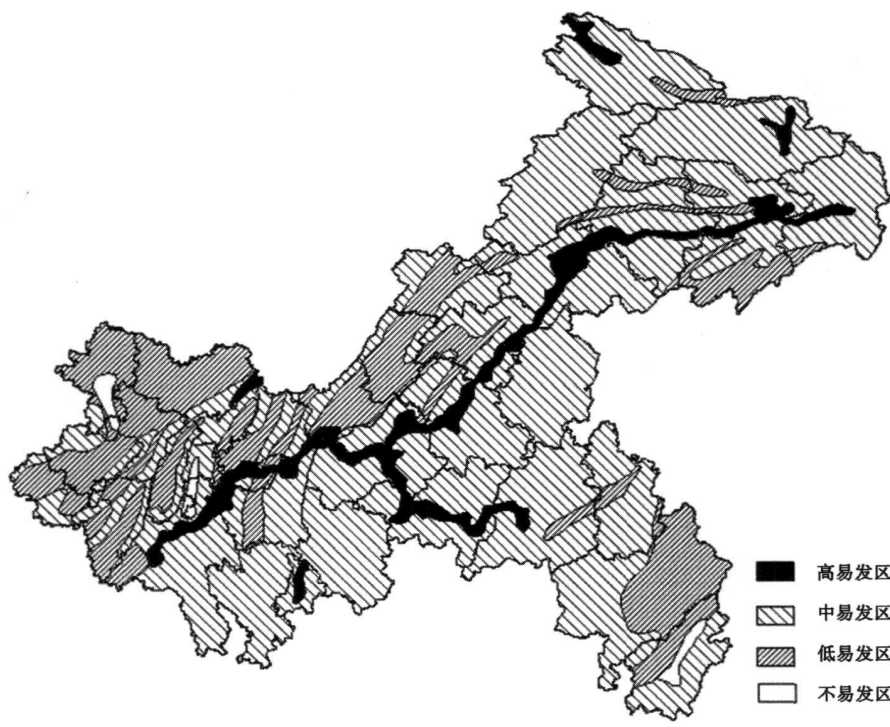


图 1 重庆地质灾害危险性分区图

Fig. 1 Geological hazard zoning map of Chongqing

内的降水情况 ( 10 d 以外的降水对滑坡影响很小 ), 每个个例的降水只统计一次, 即当日已统计出现 > 10 mm 的降水后, 前期不论出现多大的降水均不再统计, 然后分别计算每天滑坡发生的概率。

2.3 函数拟合

由统计结果可以看出, 在高易滑区前 5 d 的大降水 ( 这里指 > 10 mm 的降水 ) 对其滑坡发生有较大影响, 在中易滑区前 4 d 的降水对其滑坡有较大影响, 而在低易滑区只有前 3 d 的降水对其有较大影响, 其影响累计概率在 89% 以上。由于不易滑区个例资料很少不作为本文分析重点, 但是可以根据以上统计规律推测, 在不易滑区大降水对滑坡的影响时间更短。同时统计表明, 当日 > 10 mm 大降水诱发滑坡发生概率, 在高易滑区为 53.64%, 中易滑区为 63.51%, 低易滑区为 65.31%, 因此可以认为, 降水对不同滑坡危险等级的区域的影响是不同的, 越容易产生滑坡的区域其前期降水的潜在影响越大。

根据以上的统计结果, 采用数学方法分别对不同易发分区内的滑坡发生概率进行函数拟合, 发现

其遵循指数函数规律, 公式 ( 2 )、( 3 )、( 4 ) 分别为高易发区、中易发区和低易发区拟合函数。图 2 图 3 图 4 分别为高易发区、中易发区和低易发区拟合图像, 其拟合率达 99% 以上。

表 1 不同地质灾害易发分区内前期大降水诱发滑坡发生概率  
Table 1 Landslide probability was produced by former heavy rainfall on different geological hazard regions

时间	高易滑区概率 ( % )	中易滑区概率 ( % )	低易滑区概率 ( % )
当天	53.64	63.51	65.31
前一天	13.10	9.83	12.76
前两天	6.80	5.60	4.85
前三天	7.52	5.60	5.86
前四天	6.80	4.73	2.55
前五天	4.37	2.82	2.04
前六天	1.46	2.00	2.04
前七天	3.39	2.86	1.28
前八天	1.46	1.55	1.78
前九天	1.46	1.50	1.53

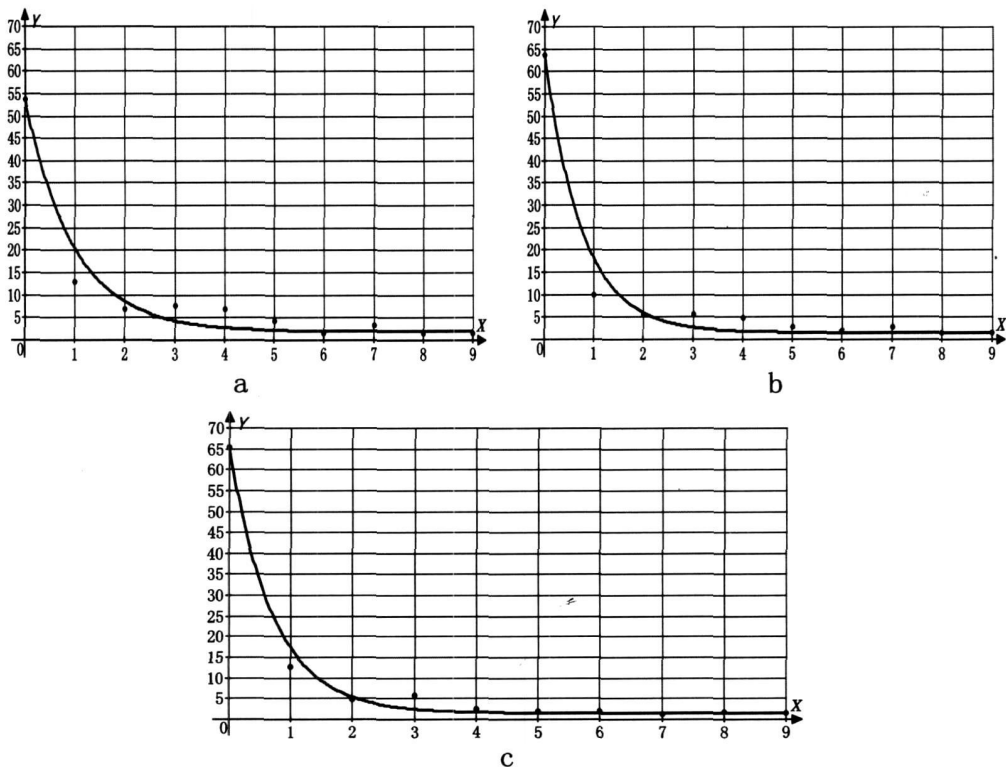


图 2 不同地质灾害易发分区内滑坡发生概率函数拟合图  
( a 高易发区 b 中易发区 c 低易发区 )

Fig. 2 Fitting function map of landslide probability on the different areas of landslide prone  
( a high-prone areas b Medium-prone areas c low-prone areas)

$f(x) = 51.7\exp(-1.03x) + 1.94$  (2)

$f(x) = 61.98\exp(-1.32x) + 1.53$  (3)

$f(x) = 63.78\exp(-1.4x) + 1.53$  (4)

公式 (2)、(3)、(4)中  $x$  为滑坡发生前第几天, 如滑坡当天,  $x = 0$  滑坡前一天,  $x = 1$  以此类推。  $f(x)$  是滑坡前第  $x$  天的降水量对滑坡的贡献率 (%), 即公式 (1) 中的影响系数。因此滑坡有效降水量方程就可以改写为公式 (5) 的形式

$$R = \sum_{x=0}^n R_x (f(x) / 100)$$
 (5)

2.4 预报指标的确定

根据滑坡有效降水量计算公式 (5), 我们分类计算了每个滑坡个例的 10 d 有效降水量, 统计了不同区域内有效降水量所占的累计概率, 结合业务应用经验, 当滑坡概率 < 35% 时定义为一级, 当滑坡概率在 35% ~ 50% 定义为二级, 当滑坡概率在 50% ~ 80% 定义为三级, 当滑坡概率在 80% ~ 90% 定义为四级, 90% 以上时定义为五级。因此根据这一定义, 我们就可以确定出不同风险区内的有效降水滑坡等级预报指标 (表 2)。

同时, 根据不同地质灾害易发分区内滑坡发生累计概率与有效降水量关系图 (图 3), 可以看出, 在不同地质灾害易发分区内相同的有效降水产生的滑坡概率是不同的, 在地质灾害高易发区和中易发区中, < 25 mm 的有效降水中, 高易发区内滑坡发生概

率明显高于中易发区的概率, 当有效降水 > 25 mm 时滑坡发生的概率基本接近。而在低易滑区内同样的有效降水量的滑坡发生概率要比高易发区和中易发区低得多。

表 2 不同地质灾害易发分区内滑坡预报指标

Table 2 Landslide forecast indicators on different geological hazard regions

临界有效降水量 (mm)	高易滑区	中易滑区	低易滑区
一级	$R < 5$	$R < 10$	$R < 15$
二级	$5 \leq R < 15$	$10 \leq R < 20$	$15 \leq R < 30$
三级	$15 \leq R < 30$	$20 \leq R < 40$	$30 \leq R < 80$
四级	$30 \leq R < 55$	$40 \leq R < 60$	$80 \leq R < 95$
五级	$R \geq 55$	$R \geq 60$	$R \geq 95$

3 滑坡预报模型在业务中的应用

滑坡预报模型建立后, 开展了业务试运行。结合全市中尺度自动站降水实况资料和中尺度数值模式高分辨率降水预报, 采用降水要素空间化方法, 将降水实况和预报网格化, 应用建立起来的不同地质灾害易发分区滑坡有效降水量计算模型分别计算每一网格点单元的有效降水量, 结合各分区内滑坡预报指标确定出相应的滑坡预报等级, 从而实现了山体滑坡预报的精细化。

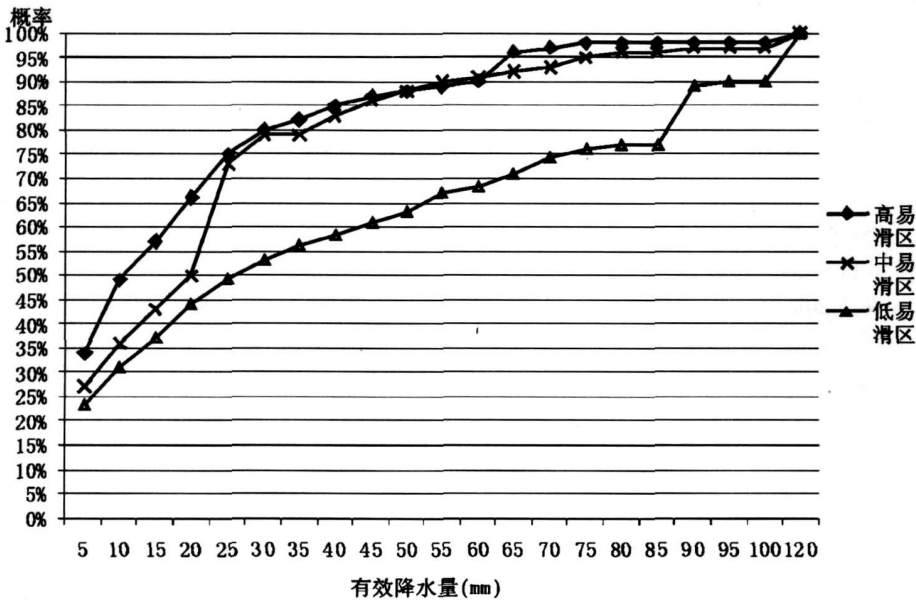


图 3 不同地质灾害易发分区内滑坡发生累计概率与有效降水量关系图

Fig 3 The relationship between cumulative probability and the effective precipitation to produce landslide

on different geological hazard regions

## 4 结语

通过对重庆市不同地质灾害易发程度灾害区内山体滑坡个例的分析,对重庆市山体滑坡状况和分布有了较为深入的了解。同时通过对降水量对不同地质灾害易发区滑坡的影响分析,发现降水对不同滑坡危险等级区域的影响是不同的,越容易产生滑坡的区域其前期降水对滑坡的潜在影响越大。

在研究过程中引入了滑坡有效降水量计算方程,并采用数学函数拟合方法建立起了计算不同地质灾害易发程度灾害区内滑坡有效降水量方程中降水影响系数方程,且拟合率都达 99% 以上。

根据滑坡有效降水量计算模型,建立起了重庆市不同地质灾害易发程度灾害区内山体滑坡预报指标模型,为开展重庆市精细化山体滑坡气象条件等级预报打下良好的基础,在业务预报中发挥了重要作用。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhou Guobing Ma Li Forecasting operation system of mountain coast 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]

- [2] 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]
- [3] 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]
- [4] Ma Li You Yangsheng, Miao Qibin. The Research of Landslip Forecast Reduced by Strong Precipitation[J]. *Journal of Mountain Science* 2008 26(5): 583~ 589[马力,游扬声,缪启龙. 强降水诱发山体滑坡预报[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 583~ 589]
- [5] Shan Jiusheng Liu Xiufeng 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]
- [6] Tan Wanpei Wang Chenchua Yao Lingkai *et al* Rainstorm Mudrock 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]

# The Research of Landslide Forecast Model Based on the Subarea of Easily to Produce Geological Disaster

ZHOU Guobing<sup>1</sup>, MA Li<sup>2</sup>, HAN Yu<sup>1</sup>

(1. Chongqing Meteorological Observatory 401147; 2. Chongqing Meteorological Bureau 410047)

**Abstract** We collected all the cases of landslide in Chongqing during 1980 to 2006 and counted them based on the subarea of easily to produce geological disaster with Chongqing municipal bureau of land resources. The result indicated that the precipitation in the different landslide dangerous rank region influence was different, easier to have landslide region its preliminary precipitation to be bigger to its latent influence. According to the earlier period different magnitude precipitation to induce landslide, fitted the contributory ratio exponential equation of preliminary precipitation to the landslide and the effective precipitation equation of mountain landslide in the different subarea of easily to produce geological disaster. The mountain landslide forecast target model was established on the two equations, for developed the Chongqing fine refinement landslide meteorological condition rank forecast to build the good foundation.

**Key words** Landslide Forecast Model, geological disaster, subarea of easily to produce geological disaster