

三峡库区山地灾害基本特征及滑坡与降水关系

马占山^{1,2}, 张强², 朱蓉², 江志红¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044 ; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 分析三峡库区山地灾害的基本特征, 着重讨论库区滑坡灾害与前期降水量的相关关系, 运用 Fisher 判别法则建立该区滑坡发生的降水预报方程。结果表明, 三峡库区山地灾害主要出现在雨季, 7 月发生最为频繁, 灾害种类多样, 主要以滑坡为主, 降水是诱发山地灾害的主要因素; 当日和前 5 d 的暴雨日数、当日和前 10 d 降水量与滑坡发生的关系最为密切, 诱发库区滑坡灾害的主要降水类型为暴雨诱发型和多日中大雨诱发型; 通过 Fisher 判别方法, 以两个降水因子建立起的滑坡发生的预报方程, 对于三峡库区滑坡发生具有一定的判别能力, 为库区山地灾害的预防提供科学依据。

关键词: 三峡库区; 山地灾害; 降水; Fisher 判别; 预报方程

中图分类号: p569; p49

文献标识码: A

长江三峡库区一般是指长江干流重庆(寸滩站)至湖北宜昌河段, 全长 > 600 km, 区间流域面积约 5 600 km²。三峡库区地处我国地势的第二阶梯东缘, 两岸地形复杂, 高差悬殊, 山高坡陡, 河谷深切。其中山地面积占总面积的 74 %, 丘陵占 21. 7 %, 河谷坪坝占 4. 3 %^[1]。三峡库区的地貌可以以奉节为界, 分为东西两段, 奉节以西属于四川盆地东缘, 主要为侏罗系碎屑岩为主组成的山地丘陵宽谷地形, 长江河谷相对宽缓; 奉节以东主要为震旦系至三叠系碳酸盐岩组成的褶皱山地, 地质作用强烈, 河谷狭窄, 水流湍急^[2]。

三峡库区由于特殊的地形、地貌, 加上雨量充沛并且多暴雨的气候, 历来是我国山地灾害的频发区和重灾区, 如 1982- 07- 17 的云阳县鸡扒子滑坡和 1985- 06- 12 的新滩滑坡。特别是近几年, 库区山地灾害对三峡工程建设和库区人民生命财产安全的影响日益增加, 几乎每年都发生较严重的山地灾害。如 1998 年宜昌—江津段大范围滑坡及边坡变形, 造成 19 个县市不同程度受灾, 涉及 135 个乡镇, 受灾人口 8 万余人, 死 5 人, 直接经济损失 6. 1 亿元^[3]。

由此可见, 山地灾害已经严重制约着当地经济的发展并且威胁人身财产安全。因此, 开展库区山地灾害的研究有重要的科学和社会经济意义。

山地灾害的监测预报是减少其损失的关键环节, 随着各种监测手段的不断更新、学科交融的不断实现, 有关山地灾害的研究逐渐从单纯的內因研究转向内外部因素的共同作用, 对于降水诱发山地灾害的作用也日益受到重视。强降水与持续降水等气象因素的监测以及对山地灾害的影响规律研究, 成为库区山地灾害监测预警的重要环节。对于山地灾害与前期降水的关系, 国内外学者进行了许多有意义研究。例如, Jordi Corominas^[4] 在建立 Llobregat 河盆地区的滑坡与降水的关系时指出: 在没有前期降水时, 当 24~ 48 h 的降水量达到 300 mm 时, 在该区可以诱发大面积的滑坡; 当强度中等、持续时间长的降水, 24 h 降水量达到 40 mm 时可以诱发泥石流, 连续几周降水且降水量达到 200 mm 时可以诱发滑坡。Th. W. J. Van 等^[5] 在总结前人用不同水文学模型研究诱发阿尔卑斯山滑坡发生的机制时, 指出对于估算浅层滑坡的气象临界值需要详细的气

收稿日期(Received date): 2004- 10- 11; 改回日期(Accepted): 2005- 01- 15。

基金项目(Foundation item): “三峡库区地质灾害强降水诱发因子的监测、预警研究”课题资助。(Research on the monitoring and forecasting geological disasters triggered by Heavy Rain over Three-Gorge Reservoir)

作者简介(Biography): 马占山(1980-), 男, 山东烟台, 硕士, 研究方向为山地灾害和中尺度气象数值模拟。(Ma Zhanshan, male, bom in 1980, graduate student. Be engaged in mountain disasters and mesoscale meteorology numerical simulation.)

象信息,并且在水文诱发模型的分析中必须考虑地表的渗透和裂隙的影响。在国内,单九生等^[6]在研究诱发江西滑坡的降水特征时,首次运用过程雨量建立了预报滑坡发生的数学统计模型;周国兵等^[7]用 24 h 降水量和连续降水累计量建立了重庆山体滑坡气象条件等级预报业务系统。山地灾害发生的一个重要特点是区域性强,而目前对于整个三峡库区山地灾害进行全面研究的尚不多见。本文首先分析三峡库区山地灾害的特点,而后通过分析三峡库区山地灾害与前期降水量的关系,讨论两种诱发滑坡的降水类型,最后选择相应预报因子,建立预报方程。希望对研究区域的山地灾害预防提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

本文采用重庆市国土局和湖北省地质大队整理的三峡库区自 1971 年到 2003 年山地灾害原始资料,主要包括山地灾害的发生地点、发生时间、造成的损失、灾害的类型、灾害的规模、产生灾害的主导因素等。三峡库区降水资料选取国家气候中心提供的库区范围内 78 个气象观测站(图 1)自建站以来到 2003 年的逐日降水资料。

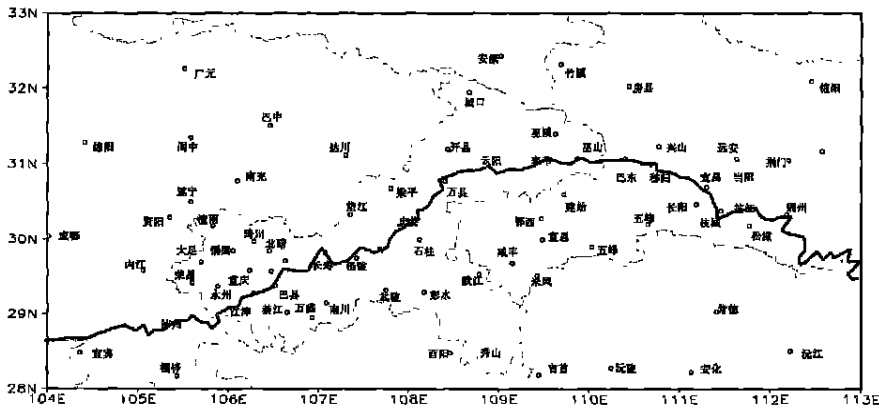


图 1 三峡库区 78 个降水站点分布图

Fig. 1 Location of 78 investigated meteorology stations over Three Gorge Reservoir

1.2 方法

采用相关系数法确定预报山地灾害的前期降水因子,采用 Fisher 判别方法建立降水诱发山地灾害的预报方程, Fisher 判别方法原理详见文后附录。

2 山地灾害基本特征

2.1 类型多、频率高,滑坡灾害严重

三峡库区山地灾害的种类主要有滑坡、崩塌、泥石流、危岩、山洪和地面塌陷,其中滑坡灾害最为严重(图 2)。在所有的 2 283 次灾害资料中,滑坡灾害发生的次数最多,为 2 038 次,占总数的 89.3%;其次为崩塌,共 153 个,占总数的 6.7%;而泥石流、危岩、山洪、地面塌陷等灾害发生频率相对较小。

2.2 空间分布集中,区域性强

由于三峡库区特殊的地形、地貌条件、地层岩性组合和局地性强降水,使该区的山地灾害具有很强

的区域性(图 3)。从图 3 中可见,库区山地灾害的多发区和高发区相对集中。灾害高发区位于重庆的忠县到湖北的秭归县沿江一带的狭长区域,该区域许多县市的山地灾害次数都超过了 150 次,尤其以万州区和云阳县为重,分别为 348 次和 251 次,占到库区总次数的 15.2% 和 11.0%。该区内的开县、忠县、巫山县、巫溪县发生的次数也较多。另外,在重庆市区内山地灾害发生的频率虽然没有前者高,但是灾害发生地较为密集,出现重庆市区内的山地灾害有‘无处不在’的现象。

2.3 年内主要出现在雨季,特别是夏季

三峡库区山地灾害年内变化如图 4 所示。从图中可见,虽然各月都出现山地灾害,但主要集中在雨季(5~9 月),占总次数的 91.9%,而又以 6~8 月最为集中,占灾害总次数的 81.1%。全年平均而言,库区山地灾害发生最多的是 7 月,共有 786 个记录,最少的月为 12 月、1 月和 2 月。这说明,库区山地

平均(1971~2000年)降水量的对应关系图。从图可见,库区山地灾害发生次数较多的月与该区降水量有很好的—致性。库区降水量最多的7月也是山地灾害最多的月。另外,在该区雨季的6~8月(月降水量都在100 mm以上),三峡库区发生的山地灾害次数也很多。进一步证实,库区降水是诱发山地灾害的一个重要因素。

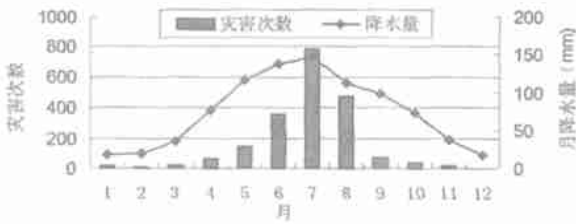


图5 三峡库区山地灾害次数年内变化与1971~2000年平均月降水量对应图

Fig. 5 Comparison between monthly numbers of mountain disasters and average rainfall in 1971 and 2000 over Three Gorge Reservoir

3.2 库区灾害分布与5~9月降水量的对应关系

图6给出的是三峡库区30 a平均5~9月降水量、暴雨日数及10 mm以上降水日数与山地灾害的空间对应关系。从图6a、b、c中可以看出库区5~9月降水量、暴雨日数和>10 mm日数的分布形式相类似。它们都有两高值区,一个高值区位于湖北省五峰县和建始一带,另一个高值区位于四川省东北部;自奉节到宜昌段,各等值线(特别是10 mm以上降水日数为22 d的等直线)有沿江分布的趋势,且江北的值小于江南的值。而该区段正是三峡库区地形起伏最明显的区域,所以降水的形成可能与地形存在密切的关系。山地灾害的高发区多位于两个高值区之间。从重庆的石柱县沿江向下的忠县、万州区、开县、云阳县直到巫溪县和巫山县,是山地灾害发生频率最高的县区。5~9月它们降水量大都分布在800 mm以上的范围内,暴雨日数多在3 d以上。这说明三峡库区的暴雨与该区山地灾害的发生存在着密切的联系。

4 诱发滑坡、崩塌的降水因子和类型

库区山地灾害中以滑坡为主,下面重点探讨滑坡灾害与前期降水的相关关系,挑选出与它发生最为密切的相关因子。先将每个月发生的山地灾害次数进行统计,然后将滑坡灾害当日和前30 d的

不同时段(当日与前5、10、15、20、25、30 d)降水中各种指标的—致性进行累加,求它们的相关系数。

4.1 滑坡灾害的相关因子

表1是滑坡次数与当日和前30 d内不同时段、不同降水类型的相关系数。从表中可见,库区滑坡灾害的发生与当日和前期降水量及暴雨日数相关关系最好,相关系数大部分都>0.80,最大的达到0.90。在其他四项中,大雨日数的相关系数较好,而与小雨日数的相关系数最低,甚至出现了负相关。以上说明,库区滑坡灾害的发生主要是由于暴雨和前期降水量的累积程度引起的,在降水的累积量方面,大雨日数也起着一定的作用。另外,随着降水与滑坡发生日期的拉长,各项的相关系数都有变小的趋势(特别是21 d之后)。这说明,研究滑坡发生与降水的关系的时间尺度不宜选择太长,虽然滑坡前期的降水可以增加土壤湿度、减少土壤阻力,但是时间尺度太长的降水会不断流失和蒸发,对于滑坡形成的作用也逐渐减小。

4.2 按降水类型划分的滑坡类型

根据滑坡发生关系密切的降水类型将滑坡分为暴雨诱发型和多日中大雨诱发型两类。

4.2.1 暴雨诱发型

定义以下两种降水特征为暴雨诱发型:①滑坡灾害发生的当日和前5 d中,出现2 d或以上日降水量在50 mm以上的暴雨;②前6 d中出现1 d降水量在50 mm以上的暴雨,且其他10 d的降水累计量在35 mm以上。统计结果为:在602个滑坡个例中,当日和前5 d降水出现暴雨的次数为265次,占到总滑坡次数的44.02%,其中第一种情况为85次,第二种情况为109次。这样暴雨诱发型的滑坡共为194次,占到总滑坡次数的38.87%。

4.2.2 多日中大雨诱发型

定义多日中大雨诱发型的—前期降水特征为:滑坡灾害发生的当日和前5 d日降水量未出现>50 mm降水,但当日和前10 d中出现了4 d以上中大雨,则定义为中大雨诱发型。统计结果:山地灾害发生当日和前5 d未出现>50 mm降水的滑坡共337次,在这337次滑坡中,当日和前10 d内出现>4 d的中大雨共205次,占总滑坡次数的34.05%。

三峡库区以上两种降水类型诱发的滑坡占到总滑坡次数的72.92%,说明以上两种降雨类型是诱发滑坡的主要因子。

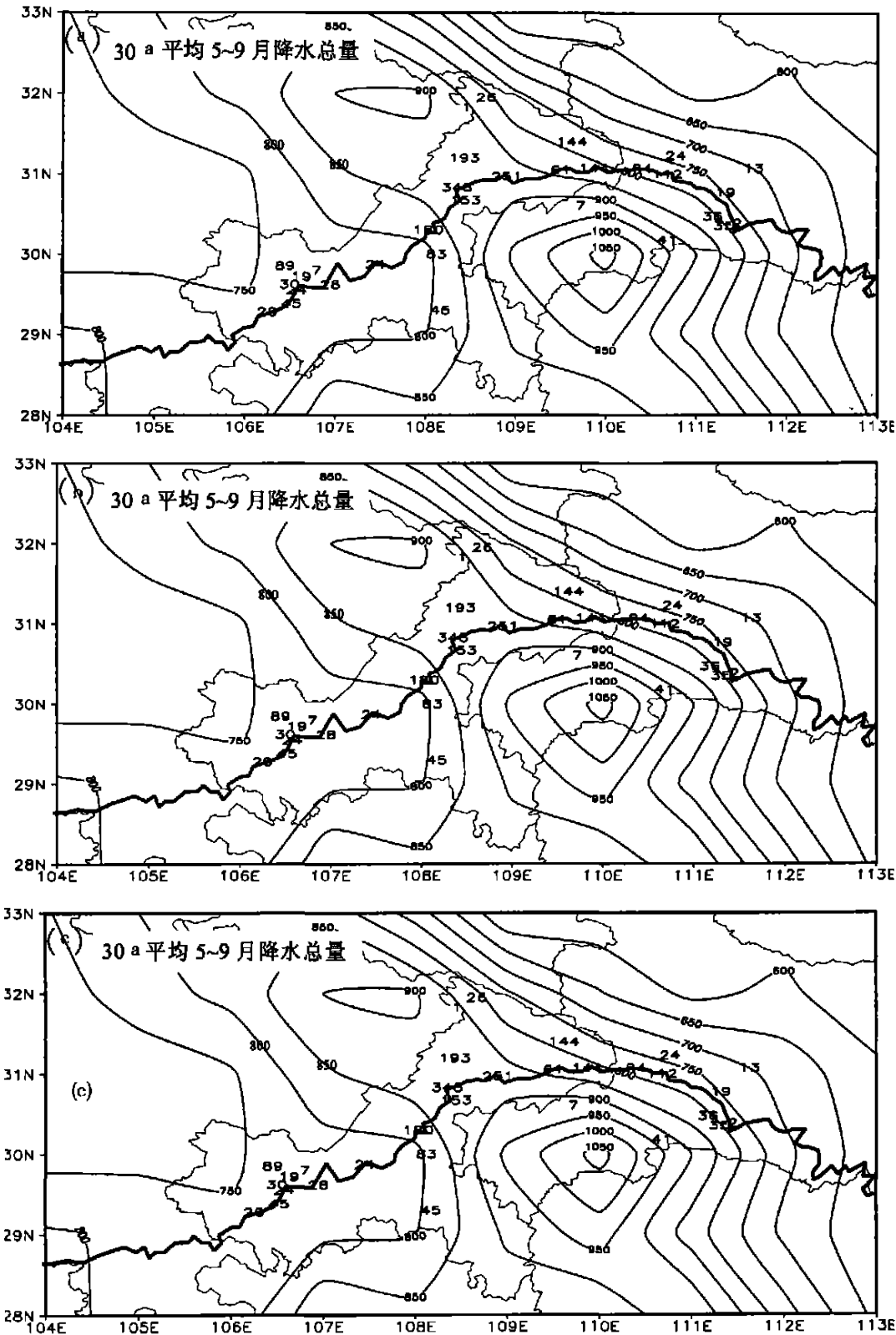


图 6 库区 1971~ 2000 年平均 5~ 9 月降水总量 (a)、暴雨日数 (b) 以及 10 mm 以上降水日数 (c) 与灾害次数的空间对应关系

Fig. 6 Comparison between distribution of mountain disasters and spatial distribution of average total rainfall (a), average days of heavy rain (b), and average days of rain beyond 10 mm in May to September in 1971 to 2000 over Three Gorge Reservoir

表 1 滑坡灾害与不同时段的不同降水类型次数的相关系数
Table1 Correlation between number of landslide and number of different rainfall
patters in their different antecedent rainfall period respectively

时间	累计降水量 (mm)	降水日数 (d)	暴雨日数 (d)	大雨日数 (d)	中雨日数 (d)	小雨日数 (d)
当日和前 5 d	0.86	0.41	0.85	0.40	0.54	0.10
当日和前 10 d	0.83	0.41	0.87	0.44	0.36	0.04
当日和前 15 d	0.83	0.38	0.90	0.42	0.30	-0.2
当日和前 20 d	0.81	0.36	0.83	0.40	0.36	-0.6
当日和前 25 d	0.76	0.34	0.77	0.40	0.41	-0.12
当日和前 30 d	0.72	0.27	0.74	0.30	0.32	-0.23

5 滑坡灾害发生的降水预报模型

5.1 因子选择及判别结果

据上面分析,本文选择上述两个因子作为建立库区滑坡灾害发生的降水预报模型的诱发因子。

1971~ 2003 年库区范围内共有 602 个有具体发生日期的滑坡灾害,选取从 1971~ 2001 年 540 个滑坡个例的当日和前期降水资料,作为发生型判别的资料。另外,采用不同台站 5~ 9 月的 500 个未发生滑坡灾害日当日和前期降水资料,作为未发生型判别的资料。用二者建立预报滑坡发生的降水判别函数式,即:在 Fisher 判别中, $N_1=540$, $N_2=500$, 经计算得到各级别差值和各因子级内离差交叉积和各元素的和如下:

$d_1=\overline{x_1^{(A)}}\overline{x_1^{(B)}}=0.559-0.190=0.369$

$d_2=\overline{x_2^{(A)}}\overline{x_2^{(B)}}=123.59-67.30=66.29$

$S_{11}=S_{11}^{(A)}+S_{11}^{(B)}=408.056$

$S_{12}=S_{12}^{(A)}+S_{12}^{(B)}=3691.96$

$S_{22}=S_{22}^{(A)}+S_{22}^{(B)}=6062230.0$

由此可得到求判别系数的联立方程组

$$\begin{cases} 408.056b_1+36913.96b_2=0.369 & (1) \\ 36913.96b_1+6062230.0b_2=66.29 & (2) \end{cases}$$

对方程求解得到判别函数的解为

$b_1=0.0001447 \quad b_2=0.0000084$

为了使用方便,将两系数同时扩大 10 000 倍,并不影响判别效果,得到三峡库区滑坡灾害发生的降水预报模型的判别式为

$$Y=1.447x_1+0.084x_2 \quad (3)$$

式中 x_1 表示样本个例的当日和前 5 d 的暴雨日数; x_2 表示样本个例的当日和前 10 d 的降水累计

量(单位:mm); Y 表示由两个降水因子所得到的判别函数值。

A, B 出现时判别函数的平均值分别为

$$\overline{Y_A}=b_1x_1^{(A)}+b_2x_2^{(A)}=8.849 \quad (4)$$

$$\overline{Y_B}=b_1x_1^{(B)}+b_2x_2^{(B)}=1.6752 \quad (5)$$

判别临界值为

$$Y_c=\frac{N_1\overline{Y_A}+N_2\overline{Y_B}}{N_1+N_2}=\frac{540\times8.849+500\times1.675}{540+500}=5.40$$

而得到的滑坡降水预报的临界值为: $Y_c=5.40$, 也就是说,当判别函数值 $Y>5.40$ 时,那么该区就会有滑坡发生;判别函数值 $Y<5.40$ 时,则没有滑坡发生。

5.2 判别方程的检验

现将库区 2002~ 2003 年未参与建立预报判别的 62 个滑坡个例的两个判别因子,以及库区各站 5~ 9 月未参加建立预报判别的 270 071 个未发生滑坡日的两个判别因子,分别带入判别方程 $Y=1.447x_1+0.084x_2$ 中,用以检验判别方程判别的性能。经检验,得到的判别结果为:在 62 个滑坡中,有 32 个滑坡的 Y_A 值 >5.40 ,即判断为发生滑坡,判别方程对于滑坡预报的正确率达到 51.6%;而在 260 071 未发生滑坡因子中,得到的 175 813 个 Y_B 值 <5.40 ,即判断为未发生滑坡,正确率达 67.6%。由上可见,通过两个前期降水因子确定的判别方程对于库区滑坡的发生与否有一定的预报能力。

6 结果与讨论

通过对三峡库区山地灾害的基本特征分析,并且着重以滑坡灾害为例研究其发生与降水的关系,得到以下有意义的结论:

1. 三峡库区山地灾害主要出现在雨季,7 月发

这样, Y_c 就可以作为判别函数判断 A, B 是否出现的临界值。当 $Y_A > Y_B$, 则当 $Y > Y_c$ 时作为 A 发生的判断, 反之, 当 $Y > Y_c$ 时作为 B 发生的判断。

参考文献 (References):

- [1] Li Huang, Zhang Qiang. Research on local climate monitoring and evaluation in the ecological and environmental monitoring system of Three-Gorge Reservoir project [M]. Beijing: Meteorology publishing house, 2003. 14~ 17. [李黄, 张强. 长江三峡工程生态与环境监测系统局地气候监测评价研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 14~ 17.]
- [2] Luo Yuanhua. How we can be kept away from geological disasters: The progress report of geological disasters preventing project over Three-Gorge Reservoir [J]. *Disaster reduction in China*, 2002, **3**: 45~ 47. [罗元华. 如何远离地质灾害——三峡库区地质灾害防治工程进展报告 [J]. 中国减灾, 2002, **3**: 45~ 47.]
- [3] Ding Renjie, Wang Chengmin, Hu Zhenghua, et al.. Seismic and geological disasters in Three-Gorge Reservoir area and their prevention and control [J]. *Journal of natural disasters*, 2001, **10**(2): 71~ 78. [丁仁杰, 汪成民, 胡正华, 等. 试论长江三峡库区地震、地质灾害及其监测、预报与防治 [J]. 自然灾害学报, 2001, **10**(2): 71~ 78.]
- [4] Jordi Cominans, Jose Moya. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain [J]. *Geomorphology*, 1999, **30**: 79~ 93.
- [5] Th. W. J. Van Asch, J. Buma, L. P. H. Van Beek, A view on some hydrological triggering in landslides [J], *Geomorphology*, 1999, **30**: 25~ 32.
- [6] Shan Jiusheng, Liu Xiufen, Weo Li, et al.. Rainfall characteristics analyses on landslide in Jiangxi province [J]. *Meteorology*, 2004, **30**(1): 13~ 16. [单九生, 刘修奋, 魏丽, 等. 诱发江西滑坡的降水特征分析 [J]. 气象, 2004, **30**(1): 13~ 16.]
- [7] Zhou Guobin, Ma Li, Liao Daiqiang. An operational grade prediction system about meteorological conditions of giant landslide slip in Chongqing city [J]. *Journal of applied meteorological science*, 2003, **14**(1): 122~ 124. [周国兵, 马力, 廖代强. 重庆市山体滑坡气象条件等级预报业务系统 [J]. 应用气象学报, 2003, **14**(1): 122~ 124.]
- [8] Tu Qipu, Wang Junde, Ding Yuguo, et al.. The application of probability theory and statistics to meteorology [M]. Beijing: Meteorology publishing house, 1984. 292~ 302. [屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学 [M]. 北京: 气象出版社, 1984. 292~ 302.]
- [9] Lou Juying. The elementary research between landslides and rainfall in Badong county and its ambient areas [J]. *Hubei meteorology*, 2001, **12**(4): 10~ 12. [罗菊英. 巴东县城及其周边地区滑坡与降水的关系初探 [J]. 湖北气象, 2001, **12**(4): 10~ 12.]
- [10] Cheng Zhenghong, Meng Bin. A preliminary analyses of spatial and temporal correlation between landslide and mud-rock flow triggered by rain and their rainfall factors in Hubei province [J]. *Rock and soil mechanics*, 1995, **16**(3): 62~ 69. [陈正洪, 孟斌. 湖北省降雨型滑坡泥石流及其降水因子的时空、相关性浅析 [J]. 岩土力学, 1995, **16**(3): 62~ 69.]

The Basic Characters of Mountain Disasters and Relationship between Landslide and Rainfall in the Area of Three-Gorge Reservoir

MA Zhanshan^{1,2}, ZHANG Qiang², ZHU Rong², JIANG Zhihong¹

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

2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper firstly we have briefly introduced the basic characters of mountain disasters in Three-Gorge Reservoir, and then our attention is laid stress on the relationship between landslides and their antecedent rainfall in the area, at last fisher discriminate technique has been used in order to establish a forecast equation about rainfall for the occurrence of landslides. The results showed that in Three-Gorge Reservoir mountain disasters mainly happen in rainy season, which occur the most frequency in July. There are many kinds of mountain disasters and landslides is most serious and precipitation is the primary factor that triggers the mountain disasters. Based on the previous analysis we have found that in this areas the occurrence of landslides is closely relative to two factors of rainfall and two different rainfall patterns triggered landslides are deduced, one type is days of heavy rain and the other is precipitation of the current day of landslides and previous days, and there are two types of precipitation triggered the mountain disasters. The forecast equation based on above two factors of rainfall has the ability to forecast the occurrences of landslides of Three-Gorge Reservoir, and the results will be a scientific basis for preventing mountain disasters in Three-Gorge Reservoir.

Key words: Three-Gorge Reservoir, mountain disasters, rainfall, fisher discriminate, forecast equation