

泥石流防治工程可靠性的超越概率

乔建平^{1,2}, 杨宗信^{1,2}, 陈权亮³, 张志明⁴, 石莉莉⁴

(1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 成都信息工程学院, 四川 成都 610041; 4. 成都地质环境监测站, 四川 成都 610000)

摘要:根据降雨频率重现期统计结果, 汶川地震灾区近年来毁坏或失效的泥石流防治工程大多与设计标准降雨频率关系不明显, 但与大暴雨和特大暴雨雨强关系密切。所以, 在泥石流防治工程可靠性评价方法中, 可以引入超越概率的概念, 亦即发生超出设计标准降雨频率的工程毁坏或失效概率。本文采用数理统计方法, 以震区都江堰泥石流工程为例, 讨论了泥石流防治工程的超越概率问题。建立了以雨强为标准的超越概率统计模型。

关键词:泥石流; 工程; 超越概率; 都江堰

文章编号:1003-8035(2014)02-0001-06

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

0 引言

由于泥石流防治工程迄今还是一门不严谨、不完善、不成熟的科学技术。因此, 存在着相当大的风险性。根据泥石流防治工程的设计标准, 一般防治工程可防御 10 ~ 30 年一遇降雨频率引发的泥石流危害^[1-4]。在不涉及工程结构和施工质量的前提下, 当发生超出设计标准的降雨频率时, 就有工程毁坏或失效的可能(如毁坝、满库、排导槽溢槽、防护堤堤底淘蚀等)。在泥石流防治工程设计中, 虽然考虑设计降雨频率标准和校核降雨频率标准, 但作者在实地调查中发现, 汶川地震灾区的一些泥石流防治工程并不完全是按照标准降雨频率毁坏或失效。往往是在大暴雨和特大暴雨的极端降雨条件下就造成破坏。而这些极端降雨有时未达到统计意义上的 50 年、100 年一遇的降雨频率标准。所以, 泥石流工程在什么降雨条件下可能失效, 不是一个简单的降雨频率问题, 而是发生一个极端雨强的概率问题。由超出泥石流防治工程设计标准的雨强事件, 可以引出泥石流防治工程超越概率的概念。如果某一地区发生超越概率的降雨事件时, 泥石流防治工程就存在失效的可能性。所以, 可以称超出设计标准的降雨事件为泥石流防治工程失效的超越概率。本文以汶川地震灾区的都江堰市为例, 讨论泥石流防治工程的超越概率问题。

1 降雨频率重现期检验

首先检验按照降雨频率统计的 N 年一遇降雨量。目前, N 年一遇的最大日降雨频率主要采用当地最大日降雨量的重现期来确定, 即采用指数分布

法^[5-6], 如:

①统计重现期

$$\hat{I} = a \lg T + b \quad (1)$$

式中: $\hat{I}$ ——降雨强度 (mm/d);

T ——重现期 (d);

a, b ——待定系数。

如把 $\lg T$ 看成函数的变量, 则上式变为线性方程:

$$\hat{y} = ax + b \quad (2)$$

式中: $\hat{y} = \hat{I}, \lg T = x$ 。

②经验重现期

$$T_i = (N + 1) / i \quad (3)$$

式中: N ——观测资料长度。

设实测降雨量观测值为: $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 数据从小到大排列。

对于式(1), 实测降雨量 y_i 与降雨量均值 $\hat{y}_i$ 的残差平方和为:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (4)$$

根据求函数极值原理, 希望 Q 极小, 则需要求 $\frac{\partial Q}{\partial a} = 0$ 、

收稿日期:2014-01-21

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAK12B01); 科技部国际合作项目(2013DFA21720); 973 项目(2010CB731504)

作者简介:乔建平(1953-), 男, 四川成都人, 研究员, 博导, 研究方向为滑坡规律、滑坡机理与滑坡危险度区划、地震滑坡。

E-mail: jpqiao@imde.ac.cn

$\frac{\partial Q}{\partial b} = 0$, 由此推出:

$$b = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i \right) = \bar{y} - a \bar{x} \quad (5)$$

将式(5)代入(4), 得:

$$Q = \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) + a(x_i - \bar{x})]^2 \quad (6)$$

由 $\frac{\partial Q}{\partial a} = 0$, 得:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

将变量 x, y 还原, 得到系数 a, b 的计算值:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})(\lg T_i - \lg \bar{T})}{\sum_{i=1}^n (\lg T_i - \lg \bar{T})^2} \quad (8)$$

$$b = \bar{I} - a \lg \bar{T} \text{ 或 } \bar{I} = a \lg \bar{T} + b \quad (9)$$

利用上式将不同时间尺度的重现期 ($\bar{T}$) 代入, 就可以得到不同重现期的降雨量要素值。

采用式(1)~(9), 可以对具备 N 年一遇降雨频率标准的雨量值重现期进行估算。有了重现期的降雨量频次, 就可以分析 N 年一遇降雨的概率。但在不具备 N 年一遇降雨频率标准的情况下, 则是难以估算。如, 在都江堰地区从 1980~2012 年 30 多年逐日降雨量资料中, 计算 30、50、100 年重现期降雨量阈值。并将 2001 年来逐日降水与该阈值进行了对比分析。结果却表明, 2001 年以来无一次日降雨量超过 30 年重现期阈值。因为都江堰气象站 2001 年以来, 记录的日最大降雨量为 2010 年 8 月 19 日 (159.6mm), 而计算的 30 年重现期降水阈值为 169.3mm, 该阈值超过 2001 年以来的日最大降雨量。其原因主要是 2001 年前, 出现了几次特大暴雨, 如: 1980 年 6 月 29 日 213.4mm, 1987 年 6 月 26 日 214.9mm, 1995 年 8 月 11 日 233.8mm。因此利用 1980~2012 年 30 多年气候平均推算的 30 年重现期降水阈值都高于 2001 年以来的日最大降雨量。2011 年 7 月 3~4 日暴雨, 新闻媒体报道为百年一遇特大暴雨。经核查, 都江堰站降雨量实际为: 7 月 1 日为 93.5mm, 7 月 2 日为 21mm, 7 月 3 日为 12.7mm, 7 月 4 日为 78.8mm。4 日降雨总量未超过 1995 年 8 月 11 日降雨量, 远未达到百年一遇特大暴雨等级。基

于 2001 年以来的日降水量极值较前期偏低, 利用 2001~2012 年 12 年的降雨数据统计, 推算 30、50、100 年重现期降雨量阈值。其结果为: 121.6mm, 143.5mm, 156.0mm。将 2001 年以来逐日降雨量与该阈值进行对比分析, 2011 年 7 月 29 日 (141mm) 与 2010 年 8 月 19 日 (159.6mm), 两次降雨过程相当于 30 年一遇标准, 其中仅 2010 年 8 月 19 日 (159.6mm) 相当于 50 年一遇标准。其他年份均无 30 年一遇重现期标准降雨量。

由于历史降雨资料的不完整, 很难对一个地区的标准降雨频率作出判断。如都江堰市降雨资料仅来源于一个气象站, 不能代表都江堰山区的实际降雨情况。所以, 采用 N 年一遇降雨频率标准建立泥石流超越概率, 缺乏震后泥石流防治工程降雨频率的统计条件。现实情况中, 自“5·12”汶川地震发生后, 已修建的泥石流防治工程在暴雨、大暴雨或特大暴雨条件下, 大多出现不同程度的损毁。而实际降雨量基本未达到 50 年一遇和 100 年一遇的降雨量标准。因此, 泥石流防治工程超越概率可以采用标准雨强计算, 如: 大雨 ($Q_1 \geq 30\text{mm}$)、暴雨 ($Q_2 \geq 50\text{mm}$)、大暴雨 ($Q_3 \geq 100\text{mm}$)、特大暴雨 ($Q_4 \geq 150\text{mm}$)。

2 降雨序列统计

根据都江堰气象站 2001 年~2012 年 12 年的降雨周期统计资料, 按大雨 ($\geq 30\text{mm}$) 以上雨强类型的总降雨量统计, 自 2008 年汶川“5·12”地震之后的 5 年中, 大雨降雨量总体呈增加趋势。其中, 2011 年大雨总量达到最高为 818.2mm (图 1)。按逐年雨强类型统计, 大雨—暴雨占主导地位, 而大暴雨、特大暴雨发生较少 (图 2)。

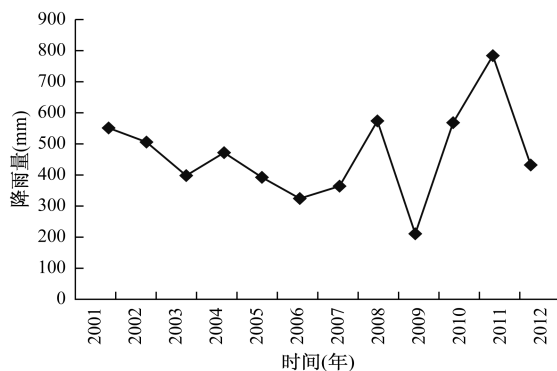


图 1 2001~2012 年大雨以上总降雨量图

Fig. 1 Total rainfall above 30mm in 2001~2012

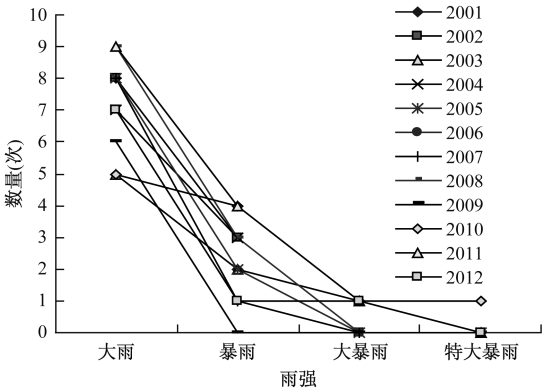


图 2 2001 ~ 2012 年雨强类型分布图

Fig. 2 Distribution of Rainfall type in 2001 ~ 2012

按雨强频次统计,大雨(89 次),暴雨(27 次),大暴雨(4 次),特大暴(1 次),其中 2008 年和 2011 年大雨以上雨强的发生频次最高(图 3、图 4)。按逐年大雨以上雨强季度分布统计结果,2001 年 ~ 2012 年的 7 ~ 9 三个月内各类雨强发生频次最高(图 5)。其中,2001 年、2010 年 7 ~ 9 月的大雨以上雨强频次最高,3 个月内分别达到 11 次和 10 次(图 6)。从主要雨强分布的 3 个月的降雨量统计中可见(图 7),2010 年和 2011 年的降雨量达到最高值,这是 2008 年“5·12”汶川地震后,灾区泥石流集中在 2012 年 7 ~ 9 月普遍暴发的重要原因。

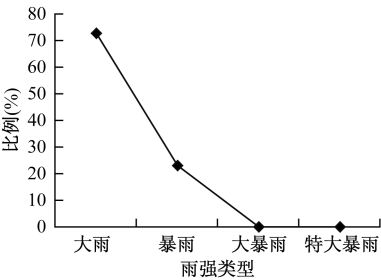


图 3 2001 ~ 2012 年大雨以上雨强类型比例

Fig. 3 Proportion of Rainfall type in 2001 ~ 2012

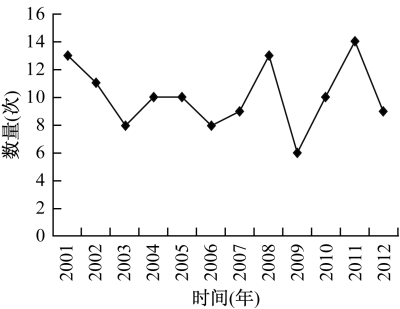


图 4 2001 ~ 2012 年年度大雨以上雨强频次分布

Fig. 4 Distribution of Rainfall above 30mm in 2001 ~ 2012

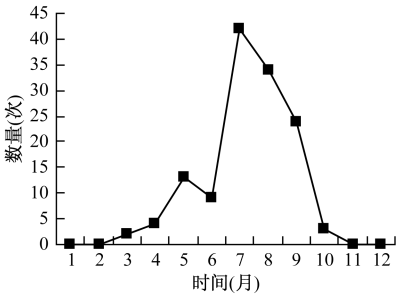


图 5 2001 ~ 2012 年每月大雨以上雨强频次分布

Fig. 5 Proportion of monthly Rainfall above 30mm in 2001 ~ 2012

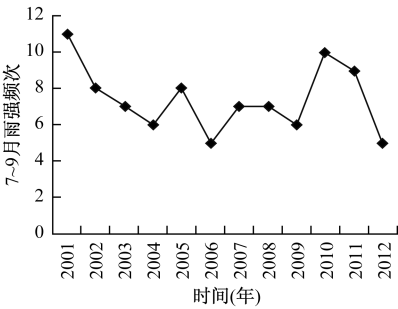


图 6 2001 ~ 2012 年 7 ~ 9 月大雨以上雨强频次分布

Fig. 6 Rainfall above 30mm in July- Sept. 2001 ~ 2012

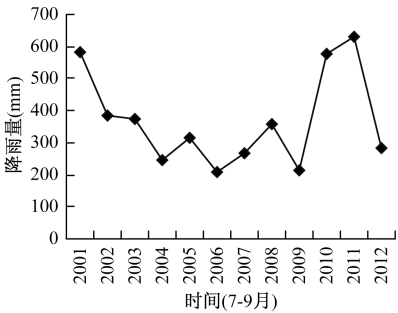


图 7 2001 ~ 2012 年 7 ~ 9 月雨量分布

Fig. 7 Distribution of total Rainfall in July- Sept. 2001 ~ 2012

据统计结果,假设暴雨为都江堰泥石流防治工程的设计频率,则可以将大暴雨、特大暴雨发生频率作为泥石流防治工程的超越概率统计。

3 数列统计的超越概率

数列统计超越概率,是对一个地区历史上发生过超设计标准的雨强频率事件数列进行统计,分析出现这些事件的发生概率^[7-8]。如上所述,采用 N

年一遇降雨频率降雨量重现期统计方法,是不易获得真实的泥石流防治工程超越概率的。因此本文将采用不同等级雨强标准的发生频率替代 N 年一遇雨强概率,作为评估泥石流防治工程的超越概率。

根据全概率的定义建立泥石流防治工程超越概率统计模型^[9],即:

$B_i = \{ \text{发生超标雨强的频率} \}$, ($i = 1, 2, \dots$)

$A_i = \{ \text{不发生超标雨强的频率} \}$, ($i = 1, 2, \dots$) 由概率条件知:

$$P(B_i) = f/N = p \quad (10)$$

$$P(A_i | B_i) = (1 - p) \quad (11)$$

则由全概率公式可获得超越概率为:

$$P_{0i} = P(A_i) = P(B_i)P(A_i | B_i) + P(A_i | B_i)P(B_i) \quad (12)$$

式中: P_{0i} ——超越概率;

f ——发生雨强频率;

N ——统计时段;

$(1 - p)$ ——不发生超标雨强的频率。

基于 2001 年以来的日降水量极值较前期偏低,利用 2001 ~ 2012 年的雨强数列统计,将大暴雨、特大暴雨作为超标频率,计算泥石流防治工程在不同雨强条件下的超越概率。

3.1 大暴雨的超越概率

3.1.1 年度超越概率

根据图 1 ~ 7 的统计数据,都江堰 2001 ~ 2012 年 12 年内共发生大暴雨 4 次,由式(10) ~ (12)按年度计算大暴雨条件的超越概率为:

$$P(B_1) = f/N = 4/12 = 0.333$$

$$P(A_1 | B_1) = (1 - p) = (1 - 0.333) = 0.667$$

$$P_{01} = P(A_1) = P(B_1)P(A_1 | B_1) + P(A_1 | B_1)P(B_1) \\ (B_1) = 0.444$$

3.1.2 季度超越概率

都江堰 2001 ~ 2012 年每年 7 ~ 9 月为大暴雨的有效月度,12 年内共有 36 个月,共发生大暴雨 4 次,同上由式(10) ~ (12)按月份计算大暴雨条件的超越概率为:

$$P_{02} = P(A_2) = P(B_2)P(A_2 | B_2) + P(A_2 | B_2)P(B_2) \\ (B_2) = 0.18$$

3.1.3 单月超越概率

都江堰 2001 ~ 2012 年 7 月和 8 月各发生大暴雨

1 次,9 月发生大 2 次,同上由式(10) ~ (12)按单月计算大暴雨条件的超越概率为:

①7 月超越概率:

$$P_{03}^7 = P(A_3) = P(B_3)P(A_3 | B_3) + P(A_3 | B_3)P(B_3) \\ P(A_3) = 0.146$$

②8 月超越概率同上 7 月为: $P_{03}^8 = 0.146$ 。

③9 月超越概率

$$P_{03}^9 = P(A_3) = P(B_3)P(A_3 | B_3) + P(A_3 | B_3)P(B_3) \\ P(B_3) = 0.276$$

3.2 特大暴雨超越概率

3.2.1 年度超越概率

都江堰 2001 ~ 2012 年 12 年内发生特大暴雨仅 1 次,同上由式(10) ~ (12)按年度计算特大暴雨条件的超越概率为:

$$P_{01}' = P(A_1) = P(B_1)P(A_1 | B_1) + P(A_1 | B_1)P(B_1) \\ (B_1) = 0.146$$

3.2.2 季度超越概率

2001 ~ 2012 年每年 7 ~ 9 月为特大暴雨可能发生的有效月度,12 年内共有 36 个月,发生特大暴雨 1 次,同上由式(10) ~ (12)按月份计算特大暴雨条件的超越概率为:

$$P_{02}' = P(A_2) = P(B_2)P(A_2 | B_2) + P(A_2 | B_2)P(B_2) \\ P(B_2) = 0.052$$

3.2.3 单月超越概率

根据图 1 ~ 7 的统计数据,都江堰 2001 ~ 2012 年 12 年内仅 2010 年的 8 月发生特大暴雨 1 次,其它月份没有发生。同上由式(10) ~ (12)按单月计算特大暴雨条件的 8 月超越概率为:

$$P_{03}'^8 = P(A_3) = P(B_3)P(A_3 | B_3) + P(A_3 | B_3)P(B_3) \\ (B_3) = 0.146$$

8 月单月发生大暴雨雨强的超越概率为: $P_{03}'^8 = 0.146$ 。7 月、9 月单月的泥石流防治工程的超越概率为: $P_{03}'^7 = P_{03}'^9 = 0$ 。

3.2.4 综合评价

根据参考文献[10],按照三级划分法可得:超越概率较低(0.444 ~ 0.388);超越概率低(0.388 ~ 0.108);超越概率极低(0.108 ~ 0.052),并获得超越概率水平评价结果(表 1):

统计结果说明,都江堰地区泥石流防治工程的超越概率总体上都较低。按设计规范施工的泥石流防治工程的安全性应该有一定保障。

表 1 泥石流防治工程超越概率水平评价表
Table 1 Exceedance probability assessment of reliability of debris flows control projects

降雨类型	年度概率	季度概率	单月概率	概率分析
大暴雨(P_{0i})	0.444	0.18	0.146(7月);0.146(8月); 0.276(9月)	年度超越概率偏低。月度、单月超越概 率低。
特大暴雨(P_{0i})	0.146	0.052	0.146(8月);7月、9月均为0	年度越概率低。月度超越概率极低,单 月的8月超越概率低。

4 讨论

(1)文中统计的降雨数据仅仅来源于都江堰市一个气象观测站,不能完全代表所有山区的实际降雨量。实际毁坏或失效的泥石流防治工程又都位于不同高程的山地环境区。所以统计的年度、季度、单月泥石流防治工程超越概率,可能存在一定区域性差异。如果能够精确到小流域的雨资料统计,才可能得到更准确的超越概率结果。论文中主要提出一种研究方法。

(2)都江堰地区特大暴雨是主要毁坏或失效泥石流防治工程因素,如2010年8月13日的特大暴雨(相当50年一遇标准)造成已建泥石流工程部分严重毁坏,但年度超越概率仅为0.146。大暴雨(相当30年一遇标准)的年度超越概率虽然达到0.444,但不是主要破坏因素。由此说明,泥石流防治工程在超过防治设计标准的情况下,有被毁坏或失效的可能,但正常情况下发生该类事件的概率是很低的。都江堰实例仅仅包括2012年之前的有效雨量数据,如果获得新的数据支持,还可以进一步修改表1中统计成果。

(3)超越概率是泥石流防治工程可靠性评价的一种方法。采用雨强代替降雨频率,评价泥石流防治工程在特殊工况条件下出现毁坏或失效的可能性,是一种新的尝试。方法中仍有不完善之处,作者将在泥石流防治工程可靠性评价的实践中,将进一步完善。

参考文献:

[1] 泥石流防治工程设计规范.(DZ/T0239-2004):7.
Design specifications on debris flow engineering control (DZ/T0239-2004):7.

[2] 刘传正.汶川地震区文家沟泥石流成因模型分析[J].地质评论,2012,58(4):699-715.
LIU Chuanzhen. Analysis on genetic model of Wenjiagou debris flows in Wenchuan earthquake area Sichuan[J]. Geological Review 2012,58(4):699-715.

[3] 陈宁生,周海波,卢阳,等.西南山区泥石流防治工程

效益浅析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(1):50-58.

CHEN Ningsheng, ZHOU Hai bo, LU Yang, et al. . Analysis of benefits of debris flow control projects in southwest mountain areas of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science Technology Edition) ,2013,40(1):50-58.

[4] 陈晓青,崔鹏,游勇,等.关于汶川地震灾区泥石流灾害工程防治标准的讨论,汶川大地震工程震害调查分析与研究,2009,4:297-303.

CHEN Xiaoqing, CUI Peng, YOU Yong, et al. Discuss on standard of debris flow engineering control in Wenchuan earthquake region [C]. Investigatin Research on Disasters in Wenchuan Earthquake Region, 2009,4: 297-303.

[5] 陈创买,陈剑兵,周文.广东年最大降雨量的重现期计算[J].广东气象,1998,3:16-17.

CHEN Chuangmai, CHEN Jianbin, ZHOU Wen. Calculation of return period on maximum monthly rainfall in Guangdong province [J]. Guangdong Meteorology, 1998,3:16-17.

[6] 陈丽霞,殷坤龙,刘长春.降雨重现期及其用于滑坡概率分析讨论[J].工程地质学报,2012,20(5):745-750.

CHEN Lixia, YIN Kunlong, LIU Changchun. Return period statistics of extreme rainfall and application to landslide probability analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2012,20(5):745-750.

[7] 乔建平,杨宗佳,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):336-342.

QIAO Jianping, YANG Zongji, TIAN Hongling. Probability anlysis based method for rainfall induced landslide warning[J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(3):336-342.

[8] 乔建平,王萌,石莉莉.区域滑坡风险评估中的区划与概率分析[J].自然灾害学报,2012,21(2):51-56.

QIAO Jianping, WANG Meng, SHI Lili. Risk zoning and probability analysis of regional landslide risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2012,21(2):51-56.

- [9] 鲜思东. 全概率公式与贝叶斯公式[M]. 科学出版社, 2012:56.
XIAN Sidong. Total probability formula and Bayes formula [M]. Science Press, 2012:56.
- [10] 乔建平, 等. 滑坡风险区划理论与实践[M]. 四川大学出版社, 2009:25.
QIAO Jianping, et al. Theory and application on landslides risk zonation[M]. Sichuan University press, 2009:25.

Exceedance probability analysis on reliability of debris flows control projects

QIAO Jian-ping^{1,2}, YANG Zong-ji^{1,2}, CHEN Quan-liang³, ZHANG Zhi-ming⁴, SHI Li-li⁴

- (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment. CAS, Chengdu 610041, China;
3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China;
4. Chengdu Geological Environment Monitoring Station, Chengdu 61000, China)

Abstract: According to the statistics results of the rainfall return period, in recent years after Wenchuan earthquake, the has great correlation with the rainfall intensity of big storms and super storms hitting instead of rainfall of design criteria of debris flow control projects. therefore, the method of exceedance probability analysis, in other word, the probability beyond the rainfall frequency of design criteria of the debris flow control projects failure, was proposed on the assessment of reliability of debris flows control projects. the model based on the rainfall frequency statistics was established grounding on the method of mathematical statistics and taking for example of debris flow control projects in Dujiangyan County, Chengdu City.

Key words: debris flow ; control projects; exceedance probability; Dujiangyan County

《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编办公系统运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从 2013 年 3 月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台(<http://zgdzzhyfz.paperopen.com/>), 不再使用原电子邮件投稿系统, 特此公告, 望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议, 请您电话 010-62170025 或者发邮件到 nitx@mail.cigem.gov.cn。

注意: 投稿作者请详细阅读首页导航栏——投稿须知!

期刊编辑部