

降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法

李长江¹, 麻士华¹, 孙乐玲², 朱兴盛¹

(1. 浙江省国土资源厅信息中心, 浙江 杭州 310007; 2. 浙江省国土资源厅地质环境处, 浙江 杭州 310007)

摘 要: 在许多地区, 前期降雨条件对滑坡的发生有重大影响, 前期有效降雨量是滑坡预报的一个重要参数。基于累积滑坡频度-降雨量分形关系导出了一种新的计算前期有效降雨量的方法。在这个方法中, 降雨衰减系数是由给定区域内引发滑坡的累积降雨阈值随观测时段天数变化的标度指数所决定, 滑坡前每天降雨对总有效雨量的贡献并非是独立的, 前 i 天降雨的衰减过程与前 $i-1$ 天的降雨相关联。

关键词: 降雨型滑坡, 预报, 前期降雨量, 有效降雨量, 分形

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

研究降雨引发的滑坡(土体和岩体滑动, 也包括泥石流和崩塌等), 除了考虑当日(或当次)降雨条件外, 还必须考虑前期降雨的影响。前期降雨通常指滑坡发生当天之前某个时段内的累积降雨。由于排泄和蒸发作用, 一场降雨的影响会随时间减小。前期降雨在扣除地表径流、蒸发等损失后, 对滑坡发生具有影响的这部分降雨称为前期有效降雨。换言之, 前期有效降雨是前期降雨经过衰减后的剩余降雨量。前期有效降雨量是滑坡预报的一个重要参数。在滑坡预报中, 对某一给定日的前期降雨是通过雨量监测网(站)获取的, 对前期降雨监测数据经过计算扣除衰减后得到前期有效降雨量。以往主要使用一种基于水文参数预测地表径流的前期降雨指数方法^[1]计算影响滑坡的前期有效降雨量, 这种方法在所考虑的前期降雨观测时段内, 每天降雨的衰减过程是相互独立的, 亦即每天降雨对总有效雨量的贡献是独立的。然而实际上, 往往是前第 i 天的降雨可能还没有衰减到零时, 前第 $i-1$ 天可能又出现降雨, 即多次降雨的衰减是相互关联的。此外, 该方法缺乏滑坡和相关降雨观测的基础, 人们在考虑

观测时段和衰减系数时存在相当的随意性。本文基于文献[2]建立的累积滑坡频度-降雨量分形关系导出了一种新的计算前期有效降雨量的方法。

1 前人提出的前期有效降雨量算法

Kohler 和 Linsley (1951)^[1]发展的一种基于水文数据预测地表径流的前期降雨指数 API (Antecedent Precipitation Index) 方法, 最先由 Crozier 和 Eyles (1980)^[3]引入降雨引发的滑坡预报研究, 作为前期土壤含水量指数, 用于计算滑坡事件降雨(滑坡发生当日降雨)之前 10 d 的有效降雨指数, 并根据有效降雨指数与日降雨量来确定引发滑坡的降雨阈值 (Crozier, 1986)^[4]。该指数表示为

$$P_{\infty} = KR_1 + K^2R_2 + \cdots + K^nR_n, \quad 0 < K < 1.0$$

$$\text{或} \quad P_{\infty} = \sum_{i=1}^n K^i R_i \quad (1)$$

这里, P_{∞} 是相对 0 d 的经校正的前期有效降雨, R_1 是 0 d 之前 1 d 的降雨量, R_n 是 0 d 前第 n d 的降雨量, K 为土层中水流出的衰减系数。Crozier 和 Eyles (1980) 考虑的前期累积降雨时间段为 10 d ($n=10$),

收稿日期 (Received date): 2010-03-11; 改回日期 (Accepted): 2010-10-31。

作者简介 (Biography): 李长江 (1951-), 重庆人, 教授级高级工程师, 主要从事矿产地质和灾害地质研究。[Li Changjiang, born in 1951; engaged mainly in research on land, mineral resources and geological hazards; now serving as a professor with the Zhejiang Information Center of Land and Resources.] E-mail: zjgmr@mail. Hz. zj. cn

并根据 Ottawa (美国) 的流量及流速数据 (Bruce 和 Clark, 1966), 取 $K = 0.84^{[5]}$ 。在该模型中假设了水的排泄和蒸发作用速率在全年保持恒定不变。

Glade 等 (2000) 在对新西兰 Hawke's Bay, Wairarapa 和 Wellington 地区滑坡发生的前期降雨条件进行评价时, 对式 (1) 作了修改, 他们给出的前期有效降雨指数为^[6]

$$P_{\infty} = R_1 + 2^d R_2 + 3^d R_3 + \cdots + n^d R_n \quad (2)$$

式中 R_1 是 0 d 之前 1 d 的降雨量, R_n 是 0 d 前第 n d 的降雨量, n 表示 0 d 前的天数。Glade 等 (2000) 取 $n = 10$ d^[6]。 d 是河流水位退水曲线系数 (hydrograph recession curve coefficient), 它由

$$y = cn^d \quad (3)$$

确定。这里 y 表示退水曲线上任一点的水位下降, n 是时间, 单位为 d, c 是常数。

由式 (1) 和式 (2) 可以看出, 在这两个并非以滑坡和相关降雨观测数据为基础的方法中, 在所考虑的前期降雨观测时段内, 每天降雨的衰减过程是相

互独立的, 亦即每天降雨对总有效雨量 (P_{∞}) 的贡献是独立的。

自 Crozier 等 (1980)^[3] 以来, 许多研究者主要采用式 (1) 或者对其略作修改后作为计算前期有效降雨量的方法, 但是各自所取的前期累积降雨时段和衰减系数差异较大 (表 1), 正如 Reed 和 Field (1992)^[7] 所指出, 人们对 API 这个模式的选择存在相当的随意性。例如, Zêzere 等 (2005)^[8] 考虑 $K = 0.9$, 取 $n = 30$; 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 (2000) 在《中国泥石流》^[9] 中取 $K = 0.8, n = 20$; 王礼先等 (2001)^[10] 在研究北京地区的泥石流时则取 $K = 0.8, n = 15$; 台湾的一些学者^[11-12] 对前期有效降雨量的计算方法在表述上与赖尾克美 (1985)^[13] 基本相同, 但各人所取的前期累积降雨时段和衰减系数也不同。

Guzzetti 等 (2007)^[14] 认为, 在滑坡预报中使用前期降雨观测的主要困难在于确定滑坡前累积降雨的时间段。由于以往的前期有效降雨量计算方法缺

表 1 现有的各种前期有效降雨量计算方法

Table 1 The existing methods for calculating effective antecedent precipitation

| 作者 | 公式 | 说明 |
|--|---|--|
| Crozier 等 (1980) ^[3] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{10} K^i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 10 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $K = 0.84$ 为衰减系数 |
| 赖尾克美 (1985) ^[13] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{14} \alpha_i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 14 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $\alpha_i = 0.5^{i/T}$ 为衰减系数, $T (= 1 \text{ d})$, 为半衰期。 |
| 潭万沛 (1991) ^[11] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{14} \alpha_i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 14 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $\alpha_i = 0.5^{i/2}$ 为衰减系数。 |
| 谢正伦 (1993) ¹⁾ | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^7 \alpha_i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 7 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $\alpha_i = 0.5^{i/T}$ 为衰减系数, $T (= 1 \text{ d})$, 为半衰期。 |
| 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 (2000) ^[9] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{20} K^i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 20 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $K = 0.8$ 为衰减系数。 |
| 王礼先等 (2001) ^[10] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{15} K^i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 15 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $K = 0.8$ 为衰减系数。 |
| 詹钱登等 (2004) ^[12] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^7 \alpha_i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 7 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $\alpha_i = 0.8$ 为衰减系数。 |
| Zêzere 等 (2005) ^[8] | $P_{\infty} = \sum_{i=1}^{30} K^i R_i$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 30 d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, $K = 0.9$ 为衰减系数。 |
| Glade 等 (2000) ^[6] | $P_{\infty} = R_1 + 2^d R_2 + 3^d R_3 + \cdots + n$ | P_{∞} 表示滑坡发生当日 (0 d) 前 n d 内的有效降雨量, R_i 为滑坡发生前第 i 天的降雨量, d 是河流水位退水曲线系数。 |

1) 谢正伦. 土石流预警系统之研究. 成功大学台南水工试验所, 研究报告第 139 号, 1993

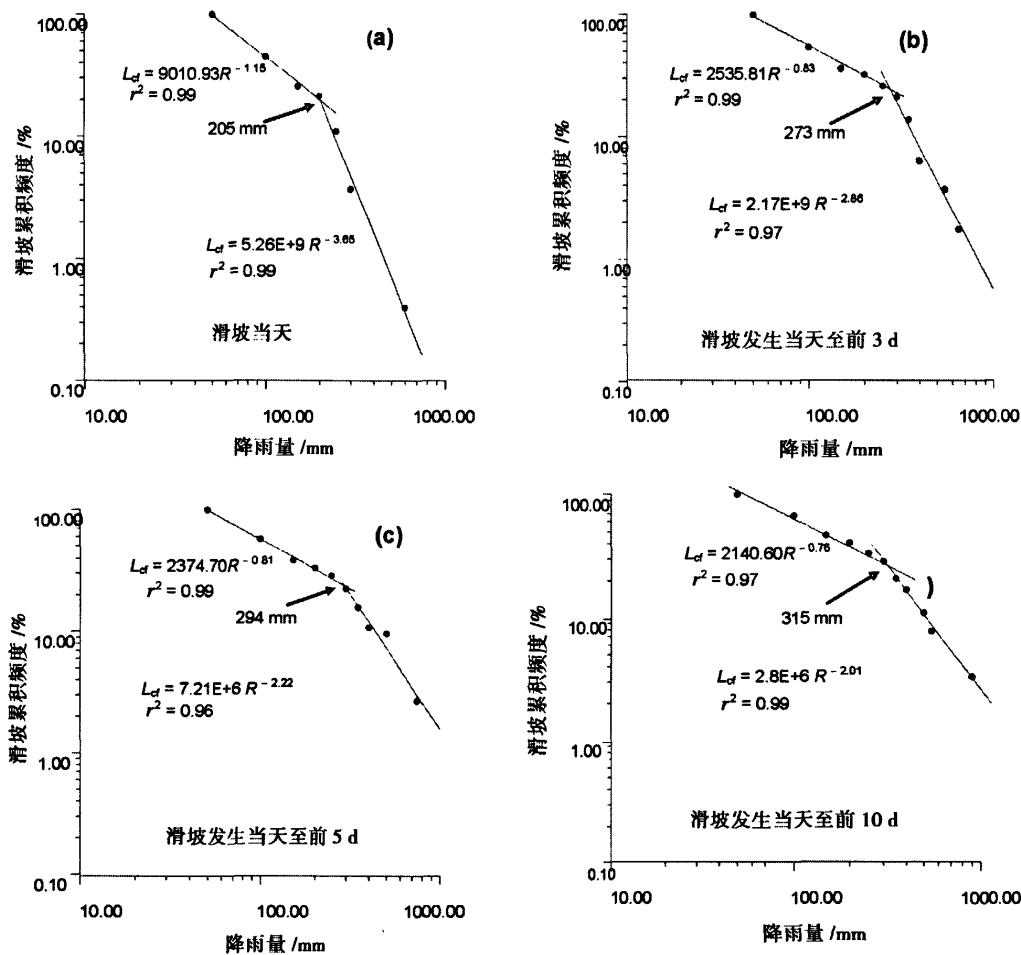


图1 浙江1990至2003期间在不同时段内累计降雨与滑坡累计频度分布的关系^[2]

Fig.1 Relationship between the cumulative frequency of landslides (L_d) and the cumulative rainfall(R) of different time intervals during the period 1990 to 2003, Zhejiang, China

表2 累计滑坡频度-降雨关系的分形分布统计结果

Table 2 Results of power-law distribution statistics for rainfall/landslides relationship

| 累计降雨时段/d | 拟合方程 | 降雨量区间/mm | L_d */ % | R_m */ mm |
|----------------|---------------------------|--------------------|------------|-------------|
| 滑坡当天 (1) | $L_d = 9010.93 R^{-1.15}$ | $50 < R \leq 205$ | 79.3 | 205 |
| | $L_d = 5.26E+9 R^{-3.65}$ | $205 < R \leq 600$ | 20.7 | |
| 滑坡当天至前3 d(4) | $L_d = 2535.81 R^{-0.83}$ | $50 < R \leq 273$ | 77.4 | 273 |
| | $L_d = 2.17E+9 R^{-2.86}$ | $273 < R \leq 650$ | 22.6 | |
| 滑坡当天至前5 d(6) | $L_d = 2374.70 R^{-0.81}$ | $50 < R \leq 294$ | 78.6 | 294 |
| | $L_d = 7.21E+6 R^{-2.22}$ | $294 < R \leq 650$ | 21.4 | |
| 滑坡当天至前10 d(11) | $L_d = 2140.60 R^{-0.76}$ | $50 < R \leq 315$ | 77.6 | 315 |
| | $L_d = 2.8E+6 R^{-2.01}$ | $315 < R \leq 700$ | 22.4 | |

* L_d 是滑坡的累计频度; R_m 是对应拐点处的降雨量,参见图1。

乏滑坡和相关的降雨观测数据基础,以至人们在考虑观测时段和衰减系数时存在相当的随意性。随着滑坡和相关降雨观测数据的积累,有必要建立一个适合滑坡预报的计算前期有效降雨量的方法。

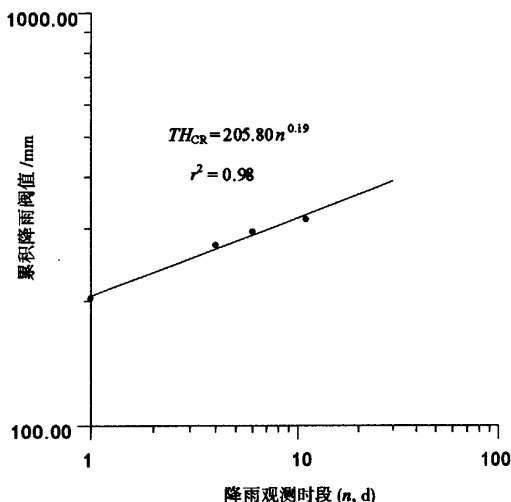


图2 引发滑坡的累积降雨阈值(TH_{CR})作为累积降雨观测时段天数(n)的函数遵循一种分形关系

Fig. 2 The cumulative rainfall thresholds triggering about 75% of landslides (R_n) as a function of number of days from the day at slope failure (n) may be described by a power-law relation

2 基于降雨-滑坡分形关系的前期有效降雨模型

在文献[2]中,我们根据浙江地区在1990—2003年期间由降雨引发,并有明确日期和坐标记录的1414个滑坡和对应的日降雨数据,对4个时段(即1 d、4 d、6 d和11 d)确定了累积滑坡频度与降雨量之间的分形关系(见图1和表2),并对各观测时段得到了引发75%以上滑坡的累积降雨阈值(TH_{CR})。这里以累积降雨阈值(TH_{CR})作为累积降雨观测时段天数(n)的函数标绘在双对数坐标图上(图2),可以发现两者之间遵循分形幂指数关系

$$TH_{CR} = 193.90 n^{0.19}, \quad 1 \leq n \leq 11 \quad (4)$$

为便于讨论,这里将滑坡发生当日记为0 d,将滑坡发生前 n d的累积降雨阈值 TH_{CR} 记为 R_n (以mm表示)。由图2有

$$R_n = C(n+1)^\alpha, \quad n = 0, 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

这里, α 是标度指数。对 $n-1$ 天,有

$$R_{n-1} = Cn^\alpha \quad (6)$$

联合式(5)和(6)消去 C ,得到

$$R_{n-1} = \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha R_n \quad (7)$$

由 R_n 减去 R_{n-1} 的剩余雨量就是第 n d降雨经衰减后的,对 $n-1$ d滑坡产生影响的有效雨量,因此,对于第 $n-1$ d的有效雨量为

$$R_n - R_{n-1} = R_n - \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha R_n$$

$$R_n - R_{n-1} = \left[1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha\right] R_n, R_n = \begin{cases} P_0 & (i=0) \\ \sum_{i=1}^n P_i & (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

这里 P_0 为0 d的降雨量, P_i 是相对0 d的前第 i d的降雨量。

我们以 P_{EA} 表示相对滑坡发生时(0 d)的前期有效降雨量,由式(8)有

$$P_{EA} = \sum_{n=1}^m \left[1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha\right] \sum_{i=1}^n P_i \quad (9)$$

式(9)中, P_i 是0 d前第 i 天的降雨量。这里定义 $1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha$ 为衰减系数。令 $h = \left(\frac{n}{n+1}\right)^\alpha$,则式(9)可写成

$$P_{EA} = \sum_{n=1}^m (1 - h^\alpha) \sum_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

式(10)与式(6.1)都显示前期降雨以指数形式衰减,但是两者的含义是不同的。在式(1)中,每天降雨的衰减过程是独立的,即每天降雨对总有效雨量(P_{∞})的贡献也是独立的。而在式(10)中,每天降雨对总有效雨量(P_{EA})的贡献并非独立的,即前 i d降雨的衰减过程与前 $i-1$ 天的降雨相关联。实际情况也是如此,例如,前第 i d的降雨可能还没有衰减到零时,前第 $i-1$ d可能又出现降雨,因此多次降雨的衰减是相互关联的,前期累积降雨对滑坡发生的影响(前期有效降雨)或许正是这种复杂的非线性衰减过程的结果。式(10)是基于降雨观测和滑坡发生频度数据得出的结果,采用这个方法计算与滑坡有关的前期有效降雨量或许比仅仅基于水文数据的API方法更为合适。

这里作为一个例子,对2006年浙江地区雨量监测网记录的日降雨数据使用式(10)计算了任一给定降雨日(0 d)前10 d的前期有效降雨量。图3表示在浙江地区结合日降雨和前期有效降雨确定的在浙江地区引发滑坡的降雨阈值下边界,就全省平均而言,引发75%以上滑坡的日降雨最小阈值为 P_0 。

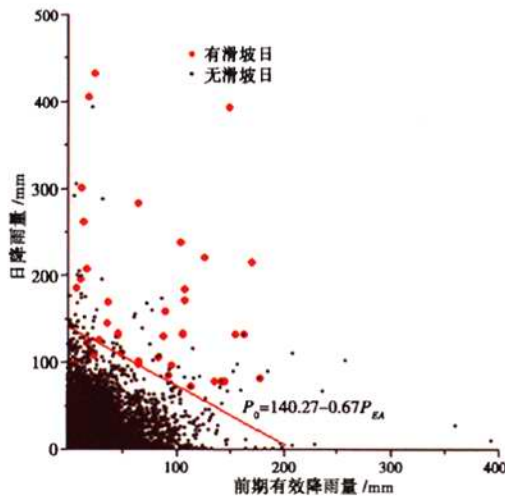


图3 浙江区域引发滑坡的最小降雨阈值

(图中前期有效降雨根据日降雨观测由式(10)计算得到)

Fig. 3 Landslide-triggering minimum rainfall threshold combining the calibrated antecedent rainfall for 10 days (using Eq. 10) and the daily rainfall data

$= 140.27 - 0.67 P_{EA}$ (见图3中的直线),从该图能够很好地识别与滑坡发生有关的区域平均降雨条件,在降雨低于该阈值线时,一般只有极个别的滑坡发生。

3 结论

在基于滑坡和相关降雨观测的分形统计建立的前期有效降雨模式中,降雨衰减系数并非固定不变的,而是由给定区域内引发滑坡的累积降雨阈值随观测时段天数变化的标度指数所决定。滑坡前每天降雨对总有效雨量的贡献并非独立的,前*i*d降雨的衰减过程与前*i*-1天的降雨相关联,前期累积降雨对滑坡发生的影响正是这种复杂的非线性衰减过程的结果。

将日降雨量与前期有效降雨量结合可以确定一个地区引发大量滑坡的降雨阈值下边界线,通过这个下边界线能够区分引发或不引发滑坡的区域平均降雨条件。

今后在滑坡实时预报系统中可以方便引入前期降雨观测数据,提高预报的效果。对任一地区,只要根据当地已知的滑坡数据和对应的日降雨观测数据确定了标度指数,在滑坡实时预报系统的日常运行

中,就可以根据任一给定日的前期降雨观测数据,非常方便地计算出前期有效降雨量,并结合对该日的24 h降雨预报进行实时的滑坡预测。

参考文献(References)

- [1] Kohler, M. A., Linsley, R. K., Predicting the run-off from storm rainfall [R]. United States Weather Bureau Research Paper 34, 1951
- [2] Li Changjiang, Ma Tuhua, Zhu Xingsheng, Forecasting of landslides triggered by rainfall: theory, methods & applications [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008 [李长江, 麻士华, 朱兴盛, 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2008]
- [3] Crozier, M. J., Eyles, R. J. Assessing the probability of rapid mass movement [M] // Proceedings of the Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, New Zealand Institute of Engineers, Proceedings of Technical Groups, 1980, 6, (1g): 247-253
- [4] Crozier, M. J. Landslides: Causes, Consequences and Environment [M]. London: Croom Helm, 1986: 185-189
- [5] Bruce, J. P., Clark, R. H. Introduction to Hydrometeorology [M]. Pergamon Press, 1966, 317
- [6] Glade, T., Crozier, M. J., Smith, P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model" [J]. Pure Appl Geophys, 2000, 157(6/8): 1059-1079
- [7] Reed, D. W. and Field, E. K. Report No. 114 Reservoir flood estimation: another look [R]. Published by the Institute of Hydrology, 1992: 29
- [8] Zêzere, J. L., Trigo, R. M., and Trigo, I. F. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5: 331-344
- [9] Institute of Mountain Hazards & Environment Chinese Academy of Sciences, Debris Flows in China [M]. Beijing: The Commercial Press Ltd, 2000: 321 [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国泥石流 [M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 321]
- [10] Wang Lixian, Yu zhimin. Forecasting of the flood and debris flows disaster [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2001: 125-126 [王礼先, 于志民, 山洪及泥石流灾害预报 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 125-126]
- [11] Tan Wanpei. Critical rainfall of debris Flow [M] // Second National Conference on Debris Flow Collection Beijing: Science Press, 1991: 136-142 [谭万沛, 降雨泥石流的临界降雨量研究 [M] // 第二届全国泥石流学术会议论文集, 北京: 科学出版社, 1991: 136-142]
- [12] Zhan Qiandeng, Li Mingxi. Rainfall warning mode of debris flow [M] // 91 Results Seminar of the Annual Project plan Disaster Prevention, 2004 [詹钱登, 李明熹, 土石流发生降雨警戒模式之研究 [M] // 九十一年度防灾专案计划成果研讨会, 2004]
- [13] Senoo, K. Rainfall indexes for debris flow warning evacuating program [J]. Shin-Sabo, 1985, 38(2): 16-21 [瀬尾克美, 土石流警戒,

避难基準としての降雨指標について,新砂防,1985,38
(2):16-21]

thresholds for the initiation of landslides[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 98(3-4):239-267

[14] Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M. & Stark C. P. Rainfall

A New Approach to Calibrate Antecedent Precipitation for Rainfall-triggering Landslide Forecast

LI¹ Changjiang, MA Tuhua¹, SUN Leling², ZHU Xinsheng¹

(1. Zhejiang Information Center of Land and Resources, Hangzhou, 310007, China;

2. Zhejiang Provincial Department of Land and Mineral Resources, Hangzhou, 310007, China)

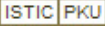
Abstract: To calibrate antecedent precipitation is a key issue for prediction of rainfall-induced landslides many regions. In this study, a method calculating for effective antecedent rainfall is derived from the power-law relation of the landslide frequency and the rainfall level. The decay factor of antecedent daily rainfall before the landslide event in this model depends on the scaling exponent defined by the power-law correlation and the decay process of daily rainfall within a given period preceding a given day is not independent but is interrelated each other, that is, the impact of rainfall in the prior i days on soil moisture is associated with the precipitation from the prior $(i-1)$ days. One practical significance of this result is that the effective antecedent rainfall can be easily determined using the available landslides and related rainfall measurements for a region.

Key words: landslides; forecast; effective antecedent precipitation; fractals

《长江上游泥石流综合危险度区划》出版

由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所钟敦伦等编制的《长江上游泥石流综合危险度区划》,最近由上海科学技术出版社出版。其为专题地图形式的长江上游泥石流危险度区划研究总结,由《长江上游泥石流综合危险度区划图》及其说明书组成,是作者对长江上游不同区域泥石流发育的环境背景、泥石流的活动与危害及分布、不同区域的经济发展程度、泥石流自然危险度区划指标与分级、社会经济水平区划指标与分级、自然危险度和经济发展程度相结合的泥石流综合危险度区划的研究成果,对长江上游山区发展及泥石流的防灾减灾具有参考意义。

(卞 泽)

作者: [李长江](#), [麻土华](#), [孙乐玲](#), [朱兴盛](#), [LI Changjiang](#), [MA Tuhua](#), [SUN Leling](#), [ZHU Xinsheng](#)
作者单位: [李长江, 麻土华, 朱兴盛, LI Changjiang, MA Tuhua, ZHU Xinsheng \(浙江省国土资源厅信息中心, 浙江杭州, 310007\)](#), [孙乐玲, SUN Leling \(浙江省国土资源厅地质环境处, 浙江杭州, 310007\)](#)
刊名: [山地学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2011, 29(1)
被引用次数: 2次

参考文献(14条)

1. [Kohler, M. A.; Linsley, R. K Predicting the run-off from storm rainfall](#) 1951
2. [李长江; 麻土华; 朱兴盛 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用](#) 2008
3. [Crozier, M. J.; Eyles, R. J Assessing the probability of rapid mass movement](#) 1980
4. [Crozier, M. J Landslides: Causes, Consequences and Environment](#) 1986
5. [Bruce, J. P.; Clark, R. H Introduction to Hydrometeorology](#) 1966
6. [Glade, T.; Crozier, M. J.; Smith, P Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"\[外文期刊\]](#) 2000(6/8)
7. [Reed, D. W.; Field, E. K Report No. 114 Reservoir flood estimation: another look](#) 1992
8. [Zezere, J. L.; Trigo, R. M.; Trigo, I. F Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region \(Portugal\): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation](#) 2005
9. [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 中国泥石流](#) 2000
10. [王礼先; 于志民 山洪及泥石流灾害预报](#) 2001
11. [潭万沛 降阿泥打流的临界降雨量研究](#) 1991
12. [詹钱髓; 李明熹 土石流发生降雨警戒模式之研究](#) 2004
13. [濑尾克美 土石流警戒、避难基准としての降雨指標について](#) 1985(02)
14. [Guzzetti F; Perucacci S; Rossi M; Stark C. P Rainfall thresholds for the initiation of landslides](#) 2007(3 -4)

本文读者也读过(10条)

1. [廖红建. 李涛. 彭建兵. LIAO Hong-jian. LI Tao. PENG Jian-bing 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究\[期刊论文\]-岩土力学](#) 2011, 32(7)
2. [尹顺德. 冯夏庭. 周辉. 赵洪波. 李邵军 降雨影响下滑坡变形预测的GA-NN模型研究\[期刊论文\]-岩土力学](#) 2003, 24(6)
3. [崔云. 孔纪名. 倪振强. 孙峰. 蔡强. Cui Yun. Kong Jiming. Ni Zhenqiang. Sun Feng. Cai Qiang 强降雨在滑坡发育中的关键控制机理及典型实例分析\[期刊论文\]-灾害学](#) 2011, 26(3)
4. [袁从华. 王荣彪. 周健. 施伟忠. YUAN Cong-hua. WANG Rong-biao. ZHOU Jian. SHI Wei-zhong 平缓红砂岩滑坡特征及警示分析\[期刊论文\]-岩土力学](#) 2006, 27(11)
5. [李德心. 何思明. 朱兴华. 吴永. 孙新坡. Li Dexin. He Siming. Zhu Xinghua. Wu Yong. Sun Xinpo 前期有效降雨对滑坡启动影响分析\[期刊论文\]-灾害学](#) 2011, 26(3)
6. [张桂荣. 殷坤龙. 刘礼领. 谢剑明. ZHANG Gui-rong. YIN Kun-long. LIU Li-ling. XIE Jian-ming 基于WEB的浙江省降雨型滑坡预警预报系统\[期刊论文\]-地球科学-中国地质大学学报](#) 2005, 30(2)

7. [任伟中](#), [范建海](#), [方晓睿](#), [白世伟](#), [杨家岭](#), [唐新建](#), [李汉波](#) [某滑坡的力学机理分析与综合整治研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2003, 24(3)
8. [许建聪](#), [尚岳全](#), [郑束宁](#), [张天宝](#), [XU Jian-cong](#), [SHANG Yue-quan](#), [ZHENG Shu-ning](#), [ZHANG Tian-bao](#) [强降雨作用下浅层滑坡尖点突变模型研究](#)[期刊论文]-[浙江大学学报（工学版）](#) 2005, 39(11)
9. [田东方](#), [刘德富](#), [郑宏](#), [王世梅](#), [TIAN Dong-fang](#), [LIU De-fu](#), [ZHENG Hong](#), [WANG Shi-mei](#) [降雨条件下滑坡排水沟排水数值模拟](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2011, 32(4)
10. [黄福明](#), [韩同春](#), [郑俊清](#), [HUANG Fu-ming](#), [HAN Tong-chun](#), [ZHENG Jun-qing](#) [降雨入渗及蒸发对土坡稳定性的影响分析](#)[期刊论文]-[低温建筑技术](#)2010, 32(11)

引证文献(2条)

1. [简文彬](#), [许旭堂](#), [郑敏洲](#), [柳侃](#), [赖树钦](#) [土坡失稳的有效降雨量研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)

2013(z2)
2. [唐亚明](#), [张茂省](#), [薛强](#), [毕俊攀](#) [滑坡监测预警国内外研究现状及评述](#)[期刊论文]-[地质论评](#) 2012(3)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101012.aspx