

泥石流预报中前期有效降水量的确定

韦方强, 胡凯衡, 陈 杰

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 前期有效降水量是泥石流预报的重要参数之一, 对不同类型泥石流的形成有不同的影响形式, 对土力类泥石流的形成主要是影响泥石流形成区土体的土壤含水量。在每次前期降水增加的土壤含水量和其有效降水量遵循相同衰减规律, 以及每次前期降水的有效降水量和其增加的土壤含水量衰减过程都是相互独立的假设条件下, 通过分析土壤含水量随时间的变化关系, 可以得到前期有效降水量与前期降水量随时间的变化关系, 从而可以确定前期有效降水量。通过对云南蒋家沟降水和土壤含水量的实际观测, 对这个关系进行了分析研究, 并利用最小二乘法得出了前期有效降水量的计算公式。

关键词: 泥石流, 预报, 前期降水量, 有效降水量

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

因降水是降水型泥石流形成的直接激发因素, 降水量则成为降水型泥石流预测预报的重要指标。对一次泥石流而言, 影响其形成的降水量包括前期降水量和当次降水量。其中, 前期降水量包括参与或影响了泥石流形成的前期有效降水量和通过地表径流、蒸发、地下径流等形式损失的前期损失降水量; 当次降水量包括从降水开始到激发泥石流形成的当次有效降水量和泥石流形成以后的剩余降水量。前期有效降水量和当次有效降水量共同决定了泥石流的形成, 是泥石流预报的重要参数。在泥石流预报研究中, 当次有效降水量依靠降水预报获取, 前期有效降水量通过对降水监测数据的分析获取。然而, 如何通过分析降水监测数据获取前期有效降水量则是十分困难的问题, 目前还没有非常可靠的方法。在以往的研究中, 濑尾克美等 (1985) 定义前期有效降水量 $R_a = \sum_{t=1}^{14} a_t R_t$, 其中 $a_t = 0.5^{t/T}$, R_t 为前第 t 天的降水量, T 为降水的半减期 (单位为 d), 无论降水大小对前期 14 d 内的降水进行线性叠加^[1]。此公式在日本广为应用, 并在应用中作了改进, 但基本形式未变^[2-6]。谭万

沛 (1988) 在研究八步里沟降雨的垂直分布特征与泥石流预报的雨量指标中, 使用当月降水量作为前期降水量^[7], 而在泥石流沟的临界雨量线分布特征研究中使用了濑尾克美和万膳英彦的计算公式^[8]。陈景武 (1990) 提出了泥石流预报前期间接雨量的计算公式为 $P_{a0} = P_1 K + P_2 K^2 + P_3 K^3 + \dots + P_n K^n$, 其中 P_{a0} 是前期间接雨量, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 为前 1, 2, 3, ..., n 日降水量, K 为递减系数, 并建议 K 取 0.8-0.9, n 取 20^[9]。谭炳炎和段爱英 (1995) 在山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究中使用了前期降水量这个概念, 但没有明确前期降水量的计算方法, 只是使用了前期降水修正系数 K , 也没有给出修正系数的具体值, 只给出了 $K \geq 1$ 这个模糊的范围^[10]。在研究台湾中部泥石流发生临界降水量时, Fan 等 (2003) 使用了前期降水衰减系数 α ^[11], 但借用了 Fedora 在研究暴雨径流时提出的前期降水衰减系数 (其中 α 为流域面积)^[12], 并使 $\alpha = \sqrt{k}$ 。从这些研究中可以看出, 在前期有效降水量的计算中有两个参数是难以确定的, 一个是递减系数, 另一个是应当计算在内的天数。并且在现有的研究中无论降水量多大,

收稿日期 (Received date): 2005- 04- 11; 改回日期 (Accepted): 2005- 06- 02。

基金项目 (Foundation item): 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX3-SW-352), 国家杰出青年科学基金项目 (40025103) 和中国科学院成都山地所创新前沿项目 (C3200307) 资助 [Supported by the Knowledge Innovation Program of CAS (KZCX3-SW-352), the National Natural Science Foundation of China (40025103) and Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS (C3200307).]

作者简介 (Biography): 韦方强 (1968-), 山东临沭人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害减灾理论和技术研究。 [Wei Fangqiang (1968-), Professor, Undertaking research on theory and technology of mountain hazards mitigation.]

只要在计算的天数内都被计算进去,而实际上有些较小的降水在很短时间就可能已被蒸发耗尽,不会对泥石流形成有任何影响,但还是被计算成有效降水量。正因为计算前期有效降水量存在这些问题和困难,在许多的泥石流预报研究中忽略了前期降水的作用,而未将其作为泥石流预报的指标之一。为了解决存在的这些问题,必须对降水在降水后对泥石流形成作用的衰减过程和衰减规律进行研究,建立基于降水作用衰减规律的模型,以满足泥石流预报的需要。

根据对泥石流的野外观测和吴积善等(1993)的研究^[13],降水型泥石流的形成可以分为两种形式。一种是降水造成泥石流形成区土体含水量和土力学特性的变化,使土体失稳而启动形成泥石流,另一种是降水造成地表径流的增加,通过强大地表径流的作用形成泥石流。对于第一种类型,对前期有效降水量的研究主要应从降水后土壤含水量的衰减过程进行研究,而对第二种类型则主要应从降水后地表径流的衰减过程去研究。地表径流衰减过程和规律在水文学上已有较多研究,许多研究成果可以直接应用到对水力类泥石流预报前期降水量的研究中。本研究主要根据云南蒋家沟(中国科学院东川泥石流观测研究站建立在此流域)泥石流形成的特点重点从土壤含水量衰减过程角度,通过野外观测的方法研究土力类泥石流预报中前期有效降水量的确定方法。

1 前期有效降水量和土壤含水量变化间的关系

对于土力类起动的泥石流,土壤含水量是决定其能否起动的关键性因素之一,而土壤含水量的增加主要是由降水造成的,所以二者存在着紧密的关系。降水导致土壤含水量的迅速增加,而降水过后因径流和蒸发等原因土壤含水量又迅速衰减,土壤含水量的迅速衰减造成对泥石流形成作用的迅速减弱,可以认为是该次降水对后期泥石流形成的影响迅速减弱,即泥石流形成的前期有效降水量迅速衰减。因此,降水过后土壤含水量的衰减过程与前期有效降水量间应当遵循同样的衰减规律,这样只要能够找出土壤含水量的衰减规律,就可以确定前期有效降水量的变化规律了。

当然,在前次降水的有效降水量还没衰减到零时可能又出现第二次或更多次降水,造成多次有效

降水量的叠加,同样前期降水造成的土壤含水量的变化也是如此。为了使问题简化,假设每次降水的有效降水量衰减过程是相互独立的,同样每次降水增加的土壤含水量的衰减过程也是相互独立的,则多次降水的总有效降水量是每次降水的有效降水量的线性叠加,即

$$EF = EF_1 + EF_2 + \dots + EF_n \quad (1)$$

$$EW = EW_1 + EW_2 + \dots + EW_n + c \quad (2)$$

式中 EF 是总前期有效降水量, EF_1 , EF_2 和 EF_n 分别是前 1、2 和 n 天降水的有效降水量, EW 是总土壤含水量, EW_1 , EW_2 和 EW_n 分别是前 1、2 和 n 天的降水增加的土壤含水量, c 是常数(基本土壤含水量)。

一般情况下,土壤含水量的增加随降水量的增加而递增,但因降水强度和降水过程的不同,使降水的入渗率不同,进一步造成土壤含水量增加的不一致,致使土壤含水量的增加并不随降水量的增加而严格递增。但在以 24 h 为统计时段的统计分析中,为了使问题简化,可以假设在这个时间段内出现的降水造成的土壤含水量增加随降水量的增加而线性递增。又因降水为 0 时,土壤含水量增加也为 0,所以在这一假设下,二者之间仅存在简单的系数关系。设前第 i 天的降水的有效降水量 $EF_i = f(F, i)$, 其中 F 为前第 i 天的降水量,前第 i 天的降水增加的土壤含水量 $EW_i = g(W, i)$, 其中 W 为前第 i 天在降水 F 作用下的土壤含水量增加,应有 $EF_i = kEW_i$, $F = kW$, 则 $f(F, i)$, 和 $g(W, i)$ 应遵循同样的函数形式,即 $EF_i = g(F, i)$ 。这样就把无法直接确定的有效降水量问题转化成可以通过实际观测和统计学方法解决的土壤含水量问题。

2 降水量与土壤含水量的观测

为了研究降水过后土壤含水量的衰减规律,确定 $EW_i = g(W, i)$ 的函数形式,2003 年雨季在云南蒋家沟进行了连续 39 天土壤含水量和降水量的野外实地观测。

(1) 观测时间: 从 07-30 至 09-06。

(2) 观测地点: 云南省昆明市东川区蒋家沟。

(3) 观测点基本特征: 共选择 3 个观测点进行剖面观测。1 号观测点为半裸坡地,坡度 31° ,坡向 $NE25^\circ$, 2 号观测点为郁闭度高的合欢林地,坡度 40° ,坡向 $NE20^\circ$, 3 号观测点为裸露的平地。在每个观测剖面同时进行 6 个深度的土壤含水量观

测, 分别为地表、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm。

(4) 观测数据: 三个观测剖面的土壤含水量变化和降水观测数据分别在图 1~ 3 中。

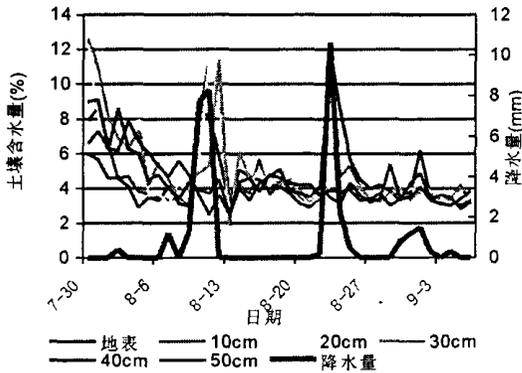


图 1 1号观测点土壤含水量和降水观测数据

Fig. 1 Observation data of rainfall and soil moisture content in the first observation point

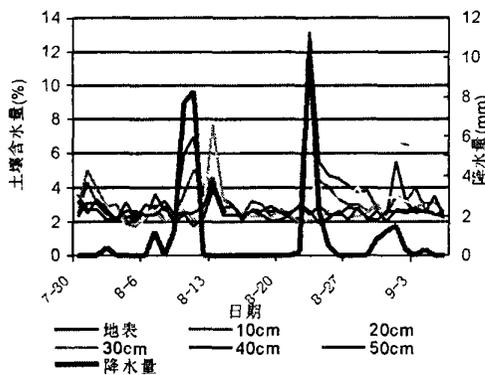


图 2 2号观测点土壤含水量和降水观测数据

Fig. 2 Observation data of rainfall and soil moisture content in the second observation point

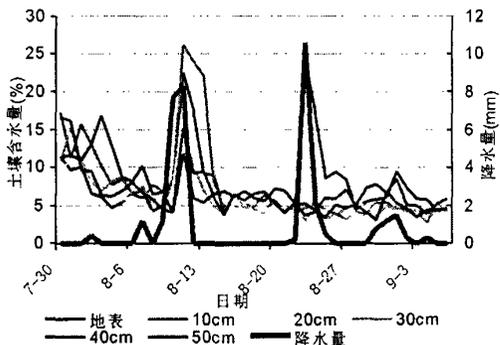


图 3 3号观测点土壤含水量和降水观测数据

Fig. 3 Observation data of rainfall and soil moisture content in the third observation point

4 数据的分析和前期有效降水量确定

4.1 观测数据分析

从图 1~ 3 的三组观测数据看, 每次降水后土壤含水量迅速增加, 降水过后土壤含水量迅速衰减, 并且衰减到一定值后保持相对稳定, 不同剖面 and 不同土壤深度的含水量都表现出相似的增加和衰减规律。根据对蒋家沟泥石流形成区的考察和观测, 主要是坡地上浅表层土体饱和后失稳, 在形成滑动后转化成流动而形成泥石流, 而形成区绝大多数是半裸(裸)坡地, 因此 1 号观测点更符合泥石流形成区的地形特征, 选择为分析对象。因大部分泥石流是浅层土体在降水作用下饱和后而形成, 一般在 20~ 30 cm 深左右, 且根据崔鹏等(2003)对蒋家沟泥石流的研究^[15]和观测数据, 一般的降水对 40 cm 以下的土壤含水量变化影响较小, 所以选择中间深度 20 cm 进行土壤含水量变化分析。

为了确定 $EW_i = g(W, i)$ 的函数形式, 对观测数据进行数理统计分析。从观测数据看, 土壤中有个基本含水量, 可以近似看作常数 c (这个基本含水量随季节变化有所差异, 特别是干湿季分明的地区, 但在泥石流多发的雨季可以将其近似为常数), 可以近似认为它与具体的每次降水无关, 因而函数 $g(W, i)$ 满足下面几个条件:

1. $g(W, i)$ 是 W 的递增函数, 是 i 的递减函数;
2. $g(W, 0) = W, g(0, i) = 0$;
3. $g(W, i)$ 衰减的非常快, 从 0 到无穷大对 i 求和应该收敛。

综合这几个条件可以假设

$$EW_i = W \times \frac{i + a^k}{(i + a)^k} \quad (3)$$

则, 土壤中的前期总含水量

$$EW = EWS_1 + EWS_2 + \dots + EWS_n + c = \sum_{i=1}^n W \times \frac{i + a^k}{(i + a)^k} + c \quad (4)$$

欲使式(4)收敛, k 必须 > 2 , 选择 08-10 至 22 的观测数据使用非线性最小二乘法对 $k=3, 4, 5$ 时进行拟合, 结果是 $k=3$ 时拟合效果最好, 并得到 $a = 0.08, c = 4.02$, 即

$$EW_i = W \frac{i + 0.08^3}{(i + 0.08)^3} \quad (5)$$

两个参数 95% 的置信区间分别为 $(-0.027, 46.01868)$ 和 $(3.565, 4.479)$, 均方根误差为

0.6148, 拟合曲线和观测数据的对比如图 4。

3.2 前期有效降水量的确定

根据土壤含水量变化和有效降水量变化的关系分析, 可以认为土壤含水量 EW_i 的变化与有效降水量 EF_i 的变化遵循同样的函数形式。因此, 前第 i 天降水的有效降水量 EF_i 可表示为

$$EF_i = F \times \frac{i + 0.08^3}{(i + 0.08)^3} \quad (6)$$

根据每次降水的有效降水量衰减过程是独立的假设, 则预报前的总前期有效降水量 EF 可以表示为

$$EF = \sum_{i=1}^n \times \frac{i + 0.08^3}{(i + 0.08)^3} \quad (7)$$

式中 F 是预报前第 i 天的降水量。

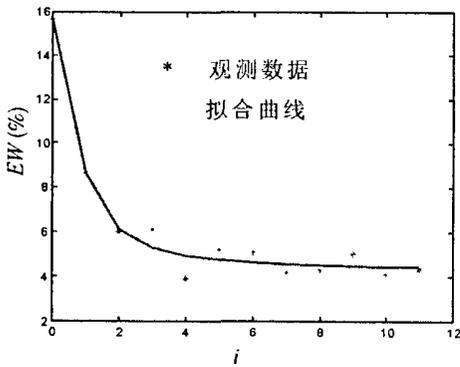


图 4 观测数据和拟合曲线的对比

Fig. 4 Comparison of fitting curve and observation data

4 结论和讨论

通过分析和研究, 可以得出如下结论:

1. 前期有效降水量的有无和多少对泥石流流的形成具有重要影响, 前期有效降水量是泥石流预报的重要指标之一。

2. 对因土体土力学特性变化引起的泥石流, 影响其形成的前期有效降水量可以通过土壤含水量来反映, 并且降水增加的土壤含水量和其有效降水量遵循相同的衰减过程, 通过分析土壤含水量的衰减规律可以获得有效降水量的变化规律。

3. 在每次降水的有效降水量衰减过程是相互独立的假设条件下, 总的前期有效降水量是前期每次降水的有效降水量的线性叠加。

4. 根据对云南蒋家沟土壤含水量和降水的观测数据分析, 该流域泥石流预报前期有效降水量的

计算公式为 $EF = \sum_{i=1}^n \times \frac{i + 0.08^3}{(i + 0.08)^3}$ 。

然而, 有效降水量存在的形式不同, 对泥石流形成的影响也不同, 在不同条件下其衰减过程也有很大的差别, 因此, 在以下方面还值得进一步的讨论和探讨:

1. 对土力类泥石流其有效降水量主要通过改变土壤含水量影响其形成, 对水力类泥石流其有效降水量主要通过改变其径流量影响泥石流的形成。本文仅对前者进行了分析研究, 今后应对后者也进行深入探讨, 并比较二者的差别, 并探寻确定前期有效降水量的普适性公式, 为泥石流预报提供更简单有效的获取前期有效降水量的方法。

2. 因土壤含水量的衰减规律受多种因素的影响, 包括气候条件、植被条件、土壤条件和地形条件等, 而本研究主要是对观测条件较好的蒋家沟进行观测和研究, 因此本研究结果的使用具有较强的局限性。为了便于泥石流预报的使用, 应对不同区域类型分别进行观测研究, 建立适于不同区域类型的有效降水量计算方法, 并绘成图表以供使用时查询。

参考文献 (References):

- [1] Senoo, K. *et al.* Rainfall indexes for debris flow warning evacuation program [J]. *Shin-Sabo*, 1985, 38 (2): 16~21 [濑尾克美, 等. 土石流警戒・避难基准としての降雨指标について [J]. 新砂防, 1985, 38 (2): 16~21]
- [2] Kubota, T. *et al.* A study on a Neural Network system for critical rainfall determination of debris flow warning and Evacuation [J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 1995, 47 (6): 8~14 [久保田哲也, 等. 土石流 生基准雨量に対するNeural Network の应用について [J]. 新砂防, 1995, 47 (6): 8~14]
- [3] Fujii, K. *et al.* Study on the Accuracy of warning and evacuation timing for debris flow [J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 1994, 47 (2): 35~42 [藤井恒一郎, 等. 土石流 生警の 令及び避难指示の 的 性向上に 门する 研究 [J]. 新砂防, 1994, 47 (2): 35~42]
- [4] Hayashi, T. *et al.* Nobutomo Osanai. Study on the management of critical rainfall determination of debris flow warning [J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 2000, 53 (2): 57~61 [林 孝标, 等. 警戒体制解除の 目安としての 土石流警戒避难基准雨量の 运用に 门する 检讨 [J]. 砂防学会, 2000, 53 (2): 57~61]
- [5] Senoo, K. *et al.* On the theme and improvement of standard rainfall of warning and evacuation from sediment disasters [J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 2001, 53 (6): 37~44 [濑尾克美, 等. 土砂灾害警戒避难基准雨量の 课题と改良について [J]. 砂防学会, 2001, 53 (6): 37~44]
- [6] Tan, W. The character of rainfall vertical distribution and critical rainfall of debris flow forecast in Babuli Gully [J]. *Sichuan Meteorology*

- orology*, 1988, **8** (2): 25~ 28 [谭万沛. 八步里沟降雨的垂直分布特征与泥石流预报的雨量指标 [J]. 四川气象, 1988, **8** (2): 25~ 28]
- [7] Tan, W. Distribution characters of critical rainfall line for the debris flow gully [J]. *Bulletin of Water and Soil Conservation*, 1989, **9** (6): 21~ 26 [谭万沛. 泥石流沟的临界雨量线分布特征 [J]. 水土保持通报, 1989, **9** (6), 21~ 26]
- [8] Tan, B. *et al.* Study on prediction for rainstorm debris flow along mountain district railways [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1995, **4** (2): 43~ 52 [谭炳炎, 等. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究 [J]. 自然灾害学报, 1995, **4** (2): 43~ 52]
- [9] Chen, J. Study on debris flow forecast in Jiangjia Gully [A]. In: Observation and Research on Debris Flows in Jiangjia Gully in Yunnan [C] (ed. Wu, J., Kang, Z. *et al.*), Beijing: Science Press, 1990, 197~ 213 [陈景武. 蒋家沟暴雨泥石流预报研究 [A]. 见: 云南蒋家沟泥石流观测研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1990. 197~ 213]
- [10] Fan J C, *et al.* Determination of critical thresholds for debris flow occurrence in central Taiwan and their revision after the 1999 ChiChi great earthquake [A]. In: Rickenmann, D, Chen, C. L. eds. Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 3rd International DFHM Conference [C]. Davos, Switzerland, September 10~ 12. Rotterdam: Mill-Press, 2003. 103~ 114
- [11] Fedora M A, *et al.* Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model. *Journal of hydrology*, 1989, **112**: 121~ 133
- [12] Wu, J. *et al.* Debris flow and its prevention [M]. Beijing: Science Press, 1993. 81~ 89 [吴积善, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. 81~ 89]
- [13] Cui, P. *et al.* Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia Gully as an Example [J]. *Science of Soil and Water Conservation* [J], 2003, **1** (1): 11~ 15 [崔鹏, 等. 前期降雨量对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例 [J]. 中国水土保持科学, 2003, **1** (1): 11~ 15]

Determination of Effective Antecedent Rainfall for Debris Flow Forecast

WEI Fangqiang, HU Kaiheng, CHEN Jie

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041*)

Abstract: Effective antecedent rainfall (EAR), one of important factors for debris flow forecast, has different ways of influencing debris flow initiation for different types of debris flow. For soil-mechanics-typed debris flow, EAR impacts its initiation by changing the soil moisture content, and for hydromechanics-typed debris flow, EAR impacts its initiation by increasing the surface runoff. For this reason, the methods of determining EAR for different types of debris flows are different. The method for the former type of debris flow is discussed in this paper. Under the assumptions that soil moisture content due to antecedent rainfall decays in the same way as EAR, and that the decays for different events are mutually independent, the variation of EAR can be carried out through analyzing the variation of soil moisture content; the EAR for debris flow forecast can then be determined. The decaying of soil moisture content has been analyzed according to the field observation of rainfall and soil moisture content in Jiangjia Gully in the province of Yunnan, where debris flows are caused by soil mechanical changing triggered by rainfall. Based on the observation and analysis, the formula of calculating EAR for Jiangjia Gully is made out with least-squares procedure.

Key words: debris flow; forecast; antecedent rainfall; effective rainfall; soil moisture content