

前期降雨对泥石流形成的贡献

——以蒋家沟泥石流形成为例

崔鹏 杨坤 陈杰

(中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 610041, 成都)

摘要 根据蒋家沟实测降雨资料,结合泥石流观测,分析泥石流形成的降雨组成和前期降雨对泥石流形成的影响。发现雨季不同时期土体含水量差异较大,而且在不同时期激发泥石流的短历时雨强也不同。通过实测确定出该流域前期降雨量的衰减系数为0.78。在此基础上应用主因素分析法对26场泥石流的降雨资料进行分析,发现前期降雨在影响泥石流的各项降雨指标中贡献超过80%。提出了有待进一步研究的问题。

关键词 泥石流; 蒋家沟; 前期降雨

水不仅是泥石流流体的主要组成部分,而且是泥石流激发的决定因素。降雨作为降雨型泥石流最活跃的形成因素被用于泥石流预测预报模式^[1-5]中。在这些模式中,多数考虑到前期降雨对泥石流的影响。有少量文献探讨过前期降雨对泥石流激发的影响^[6-8]。本文根据蒋家沟1994、1998、1999和2000年的观测资料*,进一步分析泥石流形成的前期降雨,试图定量探讨前期降雨在泥石流形成中的作用。

1 形成泥石流的降雨组成

影响泥石流发生的降雨可用图1表示。其中,主要因素如下。

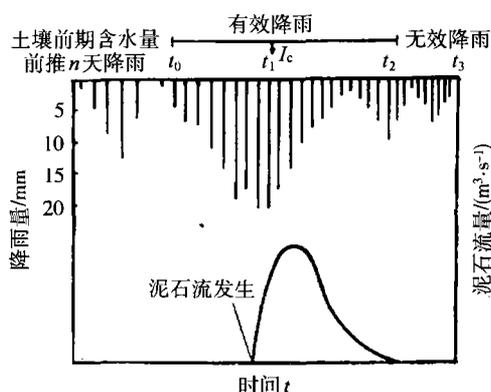


图1 形成泥石流的降雨组成

Fig.1 The relationship between rainfall and debris flow occurrence

间接前期降雨:发生本次泥石流降雨开始时刻前 n 天泥石流沟内的降雨量 P_b ^[6],即

$$P_b = \sum_{i=1}^n P_i k_i \quad (1)$$

式中: P_i 为泥石流发生前 $1 \sim n$ 天中各日降雨量, mm; k 为考虑到蒸发因素的雨量递减系数。

直接前期降雨 P_z :当场降雨中激发泥石流的短历时雨强前的降雨。

激发雨量(强) $P_c(I_c)$:激发泥石流启动的短历时强降雨,常选取1h雨强或10min雨强。

发生降雨 $P_a(t_0 - t_1)$:从泥石流发生当次降雨开始到泥石流发生时刻为止的降雨量,这是泥石流形成的主体供水。

有效雨量 $P_e(t_0 - t_2)$:从本次降雨开始到泥石流结束时的降雨。泥石流启动以后的降雨对泥石流形成作用不大,但它能增大泥石流的规模和历时。

无效降雨 $P_n(t_2 - t_3)$:泥石流过程结束以后的本次后续降雨。

前期降雨:由间接前期降雨、直接前期降雨和短历时激发雨量构成。

泥石流形成的降雨预报指标多选用发生雨量 P_a ,激发雨强 I_c 或 P_c 和间接前期降雨 P_b 。由于泥石流发生的山区,常常难以精确确定发生雨量 P_a ,因而常用日雨量 P_d 取代 P_a 。在攀西地区泥石流发生的临界日雨量为 50 mm ^[5];三峡库区的临界日雨

收稿日期:2003-03-20 修回日期:2003-03-27

项目名称:国家杰出青年科学基金项目“泥石流预测预报基础理论研究”(40025103)

作者简介:崔鹏,男,45岁,研究员,自然地理学与水土保持学专业,主要从事山地灾害研究。E-mail: pengcui@imde.ac.cn

*文中所用降雨和泥石流观测资料均取自中国科学院东川泥石流观测研究站。

量 30 mm, 雨强 6 mm/h, 有效雨 100 mm^[9]; 丹东地区泥石流发生的前期雨量为 200 mm^[10]。

2 前期降雨在泥石流形成中的作用

由图 1 可见, 泥石流暴发取决于短历时雨强和前期土体含水状况等因素, 而泥石流暴发所需要的短历时雨强的大小, 与泥石流暴发前补给物质的前期含水状况有关^[6]。前期降雨越大, 补给物质就越接近饱和, 泥石流暴发所要求的短历时雨强就越小; 反之, 亦然。

从泥石流启动过程看, 一场降雨开始后, 由于土体吸水率很大, 降雨全部渗入土壤。随着降雨的继续, 表层土体达到饱和, 地表产生积水, 导致排水不畅, 土体内孔隙水无法自由排泄, 孔隙水压力剧增, 土体的抗剪强度削减。在后续高强度降雨作用下, 土体受到短历时雨强激发而形成泥石流; 如果没有相当强度的降雨条件, 则降雨在土体中持续下渗, 使土体整体含水量达到某一水平, 为下一次降雨激发泥石流做准备。可见, 前期降雨对泥石流形成的贡献比较大, 短历时雨强主要起到激发作用。

根据相关研究, 坡面坍塌所需降雨量明显受土体前期含水量的影响^[8,11], 前期降雨可以降低滑坡滑动面抗剪强度^[7]。一般而言, 泥石流形成区的滑坡、崩塌和坡面坍塌是泥石流的重要物质来源, 因此, 不同的前期降雨可使相当数量的补给物质处于失稳状态, 为后续降雨激发泥石流提供物质准备。根据在蒋家沟进行的实验研究^[8], 角砾土的抗剪强度在随着含水量的变化过程中存在一个突变临界值, 超过这个临界含水量, 抗剪强度随含水量增加而急剧减小, 使得土体迅速失稳, 在短历时雨强激发下最终导致泥石流的暴发, 因此对于泥石流暴发前土体所接受的降雨对泥石流形成是一个较为重要的因子。

3 间接前期降雨对土体含水量的影响

探讨前期降雨对泥石流形成的影响, 其核心是研究土体含水量随着前期降雨的变化。2001 年 6 月 20 日开始在蒋家沟采用烘干法对含水率进行了连续 18 d 测定, 进而结合降雨资料对土体含水量的变化规律进行了初步探讨(见表 1)。

表 1 蒋家沟降雨与土体含水率观测数据

Tab.1 Precipitation and soil moisture in Jiangjia Gully

日期	06-20	06-21	06-22	06-23	06-24	06-25	06-26	06-27	06-28
降雨量/mm	5.3	0	0	0	0	1.3	0.7	16	5.9
含水率	0.087	0.088	0.087	0.081	0.091	0.094	0.095	0.139	0.125
日期	06-29	06-30	07-01	07-02	07-03	07-04	07-05	07-06	07-07
降雨量/mm	8.4	0.4	0	5.8	1.8	3.3	0	4.5	0
含水率	0.142	0.129	0.126	0.127	0.127	0.118	0.117	0.121	0.117

由表 1 可知, 在 6 月 20 日一次降雨发生后, 持续 4 个晴日, 土体含水率衰减较小, 基本维持在 0.087 左右。随着 6 月 25 日后降雨的持续, 土体含水量有所上升, 在 7 月初基本上趋于稳定, 达到一个平衡状态, 维持在 0.120 左右。这说明土体含水量在短期内变化不大, 但从长时间尺度上看, 不同时期土体含水状况还是有较大差异的。它对泥石流激发的短历时雨强大小有较大影响。

4 前期降雨对激发泥石流短历时雨强的影响

间接前期降雨、直接前期降雨和激发雨量三者的效果是不一样的。间接前期降雨使土体具有较高的含水量, 它在改变泥石流补给物质稳定状态的作用中占主导地位, 而直接前期降雨则起到使土体进一步失稳的作用, 在后续短历时雨强的激发下形成泥石流。

据文献^[12], 蒋家沟泥石流启动土体既有饱和的, 也有不饱和的。饱和土体在短历时雨强的激发下可以形成泥石流, 不饱和的土体也有可能因为高强度的降雨, 使其内部应力超过临界条件而产生滑动, 进而失稳形成泥石流。这 2 种情况下激发短历时雨强的大小有较大差异。对泥石流补给物质而言, 间接前期降雨可以使其处于饱和与不饱和两种不同状态, 直接前期降雨则可以使表层土体达到饱和状态。在形成泥石流过程中, 对于激发饱和土体的短历时雨强较激发不饱和土体的雨强要小。

通过泥石流形成区现场观测和数据分析, 发现形成相当规模(到达观测断面的泥石流)的泥石流, 1 h 雨量作用较大。蒋家沟雨季各月降雨差异较大(图 2), 季节性泉水出流和停止时间大致滞后雨期 15 ~ 30 d^[13]。这说明各月土体含水量大小并不与降雨同步, 而是有一定滞后, 因此, 各月的泥石流激发

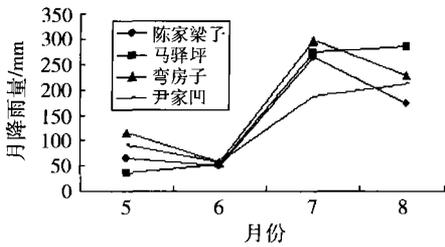


图 2 蒋家沟 1999 年 5—8 月各站月降雨量

Fig.2 Rainfall from May to August in Jiangjia Gully in 1999

雨强有所不同。就 82 场降雨分月统计出最大 1 h 雨强(泥石流暴发日统计泥石流暴发前的最大 1 h 雨强)(图 3)。由图 3 可知,各月形成泥石流的短历时

雨量差异较大。6 月由于前期没有大量的降雨,土体尚处于较干燥状态,相应的激发雨强较大;而 7 月虽然有较大降雨,但降雨在土体中下渗有个滞后期,土体尚没有大量含水,激发泥石流的雨强值仍然较大;在 8 月由于前期有大量降雨进入土体,并且下渗到一定深度,可供泥石流形成补给物质大多已经饱和,激发泥石流的雨强值相应变小。

结合表 1 分析结果可知,各月前期降雨对土体含水量的影响差异较大,雨季从开始到结束,土体含水量逐渐加大,激发泥石流的短历时雨强呈减小趋势。由此可见,对同一种土体,前期降雨与泥石流激发雨量成反相关。

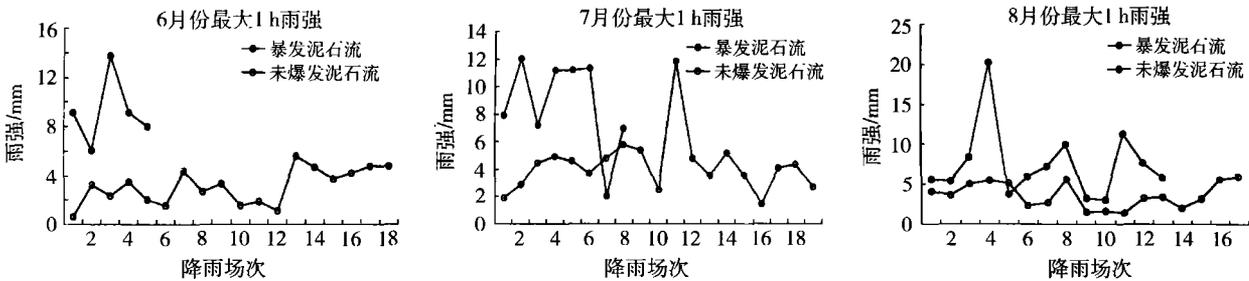


图 3 蒋家沟多年 6—8 月最大 1 h 雨强

Fig.3 The maximum hourly rainfall from June to August of many years in Jiangjia Gully

5 前期降雨对泥石流形成贡献的评估

进一步分析直接前期降雨、间接前期降雨以及短历时雨强对泥石流形成影响的显著性。

式(1)能从统计角度说明激发泥石流的降雨前泥石流补给物质含水情况。利用表 1 的数据,代入式(1)进行衰减计算,获得一组衰减系数 k 值(表 2)。为方便计算, k 值取平均值 0.78。

表 2 衰减系数统计表

Tab.2 The attenuation coefficient of antecedent precipitation

次数	1	2	3	4	5	6	7	均值
衰减系数 k	0.783 4	0.738 8	0.768 0	0.768 7	0.804 9	0.784 1	0.808 8	0.779 5

在蒋家沟,1 次过程降雨,经过逐日衰减,一般在 20 d 就基本耗尽,因此选取 20 为式(1)中 n 的最大值。直接前期降雨量取泥石流暴发前最大 1 h 雨强以前的当场降雨量。

我们通过 26 场泥石流的降雨资料统计,获得了各项降雨特征值,采用主因素分析方法^[14]对其进行分析。即将每场泥石流发生的 3 个雨量指标——间接前期降雨量、直接前期降雨量和最大 1 h 雨强作为分析变量,计算出这 26 组数据的相关系数矩阵,然后用雅可比方法求出相关系数矩阵的特征值和特征向量。由表 3 可知,第 1 主成分和第 2 主成分的累积贡献率达到 80.835%,对泥石流预报来说,就可

以主要考虑第 1 主成分和第 2 主成分。在对第 1 主成分和第 2 主成分做进一步分析后,得到因子负荷矩阵(表 4),可见:间接前期降雨和直接前期降雨对第 1 主成分的贡献最大(最大 1 h 雨强的因子负荷最小,其贡献可以忽略),可以认为第 1 主成分由二者组成;同理,第 2 主成分主要由最大 1 h 雨强构成。

由此可以说明作为第 1 主成分的间接前期降雨和直接前期降雨对泥石流形成的贡献较大(44.326%),而最大 1 h 雨强作为第 2 主成分在泥石流形成中的激发作用也不可忽视(36.509%)。同时看到 2 个主成分的信息百分比差异不是特别大,可见最大 1 h 雨强与间接前期降雨和直接前期降雨的

联合作用才最终导致了泥石流的发生,在泥石流预测中,必须同时考虑三者的作用。

表3 相关系数矩阵特征值及主成分

Tab.3 Eigenvalues of correlation coefficient matrix and principal components

主成分	特征值	信息百分比/%	信息累积百分比/%
第1主成分	1.330	44.326	44.326
第2主成分	1.095	36.509	80.835
第3主成分	0.575	19.165	100.000

表4 因子负荷矩阵

Tab.4 Rotated component matrix

降雨指标	第1主成分	第2主成分
间接前期降雨量	0.859	-0.253
直接前期降雨量	-0.746	-0.442
最大1h雨强	-0.029	0.934

上述结果从降雨渗透过程与泥石流土体侵蚀启动方面也可很好地说明。一般而言,要产生泥石流必须使得土体达到一定的含水量,而间接前期降雨和直接前期降雨正是通过使土体含水量增加,抗剪强度减小,改变土体稳定状态,而对泥石流的形成起作用。短历时雨强的激发作用虽然重要,但如果土体具备一定的含水量,仅靠1h雨强的激发作用一般来说是难以产生泥石流的,而仅仅依靠间接前期降雨和直接前期降雨使泥石流发生也相当困难。这与主因素分析的结果相吻合。

6 结论与讨论

间接前期降雨和直接前期降雨在影响泥石流形成的降雨指标中贡献最大,在泥石流预测预报中应重视间接前期降雨和直接前期降雨指标,避免单强调短历时雨强指标的不足。

间接前期降雨和直接前期降雨使得土体含水量在不同时期差异很大,直接影响到激发泥石流的短历时雨强。在蒋家沟流域,二者成反相关关系。

泥石流暴发前的土体含水量微观变化对泥石流的激发雨强有着不可忽视的作用,特别是直接前期降雨对土体含水量变化的影响。在形成区观测泥石流的形成过程时发现,泥石流暴发前地表径流出现断流现象,在这个过程中土体含水量变化无疑对泥石流的形成有着特殊的影响,因此进一步对直接前期降雨与形成区土体含水量变化关系的研究非常必要。

间接前期降雨和直接前期降雨导致不同时期激

发泥石流的短历时雨强值差异较大,而常规的前期降雨量处理方法仅将降雨前期多日降雨进行近似的衰减计算后与泥石流暴发前的降雨量进行简单求和,作为前期降雨对土体总的贡献。这种处理弱化了直接前期降雨对土体含水量和土体强度影响的贡献,同时对前期降雨影响的确定也比较模糊。事实上,间接前期降雨与直接前期降雨对泥石流形成的作用机理有一定差异。如何定量地区别二者的作用,寻找能较好反映其对土体含水量和土体强度影响的关系,是今后深入研究的课题。

本研究仅就前期降雨对泥石流形成的影响做了一点粗浅的探讨,诚望指正和改进。

本研究得到中国科学院东川泥石流观测研究站全体同仁的支持和帮助并允许使用资料,谨致谢忱。

7 参考文献

- 1 陈景武. 我国暴雨泥石流预报研究//第四届全国泥石流学术讨论会论文集. 兰州:甘肃文化出版社,1994
- 2 谭万沛,韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究. 灾害学,1992,7(2):37-42
- 3 谭炳炎,段受英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究. 自然灾害学报,1995,4(2):43-52
- 4 魏永明,谢又予. 降雨型泥石流水石流预报模型研究. 自然灾害学报,1997,6(4):48-53
- 5 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. 成都:四川科学技术出版社,1994
- 6 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析//全国泥石流学术论文集,1980:93-99
- 7 李昌志,刘兴年,曹叔尤,等. 前期降雨与不同沙源条件小流域产沙关系的对比研究. 水土保持学报,2001,15(6):36-39
- 8 王裕宜,邹仁元,李昌志. 泥石流土体侵蚀与始发雨量的相关性研究. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(6):34-38
- 9 王发读. 浅层堆积层滑坡特征及其与降雨的关系初探//第四届泥石流学术讨论会论文集. 兰州:甘肃文化出版社,1994:38-545
- 10 高明辛,程岩. 丹东地区暴雨特点与泥石流活动关系的研究//第四届泥石流学术讨论会论文集. 兰州:甘肃文化出版社,1994:204-213
- 11 张丽萍,唐克丽. 泥石流源地松散体启动人工降雨模拟及放水冲刷实验. 山地学报,1999,17(1):45
- 12 郭仲三,田连权. 蒋家沟坡地土力类泥石流启动的动力学模型//杜榕桓. 泥石流观测与研究. 北京:科学出版社,1996:57-63

- 13 吴积善,康志成,田连权. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京:科学出版社,1990:22-26
- 14 黄海,罗友丰,陈志英,等. SPSS 10.0 for Windows 统计分析. 北京:人民邮电出版社,2001:341-349

Relationship Between Occurrence of Debris Flow and Antecedent Precipitation: Taking the Jiangjia Gully as An Example

Cui Peng Yang Kun Chen Jie

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, 610041, Chengdu, China)

Abstract Characteristics of precipitation in source area of debris flow in Jiangjia Gully is presented corresponding to the occurrences of debris flow. The relationship between rainfall and debris flow occurrence and the impacts of antecedent precipitation on occurrence of debris flow and are discussed. It is found that the moisture of soil varies greatly and the intensity of short duration rainfall triggering debris flow changes in different part of rainfall period. Experiment indicates that the attenuation coefficient of antecedent rainfall is 0.78. The method of principal components analysis is applied to study the impact of the rainfall factors on occurrence of debris flow in order to understand the contribution of antecedent precipitation. The results show the contribution of antecedent precipitation is maximum. Questions are raised for further study.

Key words debris flow; Jiangjia Gully; antecedent precipitation

《生态工程建设监理》出版发行

我国第一部《生态工程建设监理》一书由中国标准出版社出版。

生态工程建设纳入基本建设管理程序,实行建设监理是一项全新的工作。本书作者姜德文同志潜心研究并系统学习和运用了工程监理的理论、方法、技术路线和实践经验,分析了生态工程的建设管理特点,总结了各地开展生态工程监理的成功经验,编著了此书。书中概述了我国生态环境状况及生态建设规划,介绍了基本建设项目管理模式、“三制”管理要求、生态工程监理的组织与管理;重点研究和阐述了生态工程监理中质量控制、进度控制、投资控制、合同管理、信息管理及协调工作的主要任务、基本要求和具体做法;介绍了常用的监理规划、监理实施细则、实施方案、监理报告等文件的编制,并编制了生态工程监理常用的表格式样。对建设监理工程师学习和掌握生态工程的基本知识,对生态工程技术人

员学习和了解工程监理常识、规范地开展生态工程建设监理有指导作用。

本书既可作为生态工程监理工程师的学习教材和技术手册,也可供计划、林业、水利、农业、水土保持、财政、环境保护等生态工程技术人员和管理人员参考。

本书定价 32 元,另加收 10% 的邮寄费。需要者请与中国水土保持学会联系,汇款通过邮局或银行均可。

开户行:北京市海淀区工商行东升分理处

户名:中国水土保持学会

账号:020000 62090144 32774

通讯地址:北京市清华东路 35 号北京林业大学内中国水土保持学会

邮编:100083 电话:010-62338045

联系人:魏月芬