

# 泥石流源地松散体起动人工降雨 模拟及放水冲刷实验<sup>\*</sup>

张丽萍<sup>1</sup> 唐克丽<sup>2</sup> 张平仓<sup>2</sup> 除文亮<sup>2</sup>

(1 南京大学海岸与海岛开发国家试点实验室 南京 210093; 2 中国科学院、水利部水土保持研究所 杨陵 712100)

**提 要** 以神府—东胜矿区人为泥石流及云南东川蒋家沟自然泥石流为研究对象, 采用人工降雨及放水冲刷模拟实验方法, 分析了不同类型、不同地区泥石流源地松散体起动条件及泥石流过程, 得出一些有意义的结论。

**关键词** 泥石流 松散体起动 人工降雨模拟 放水冲刷实验

**分类号** 《中图法》P642.23

人为泥石流与自然泥石流的成因不同, 其起动条件、暴发机理均有很大的差异。为了研究人为泥石流和自然泥石流起动及过程的差异, 选择云南东川蒋家沟(自然泥石流)及神府—东胜矿区(人为泥石流)为实验基地。进行了人工降雨模拟与放水冲刷实验。

## 1 神府—东胜矿区与东川蒋家沟泥石流形成的环境差异

### 1.1 神府—东胜矿区泥石流形成的环境条件

神府—东胜矿区地处干旱、半干旱过渡地带, 从东南向西北, 地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵、缓坡风沙丘陵、半固定流动沙丘区。暴露于地表的基岩为极易风化的中生代砂岩、砂页岩及泥岩, 富含煤层。地形高低起伏。温带大陆性季风气候特征显著, 干旱多风, 温差大, 降水少而集中, 多以暴雨出现。据史料记载, 该区飞沙尘暴常出不断, 未发现有泥石流现象的记载, 实地调查也未发现地质历史时期及有史记载以来的泥石流痕迹。自 20 世纪 80 年代以来煤田的大面积开采, 交通、电厂配套设施的开工上马, 大量开采石料, 排放矿渣, 加大地面坡度, 在暴雨集中冲刷作用下, 暴发了多次规模不等的泥石流。

### 1.2 云南东川蒋家沟泥石流形成的环境条件

东川蒋家沟位于云南省的东北部, 是一条典型的泥石流沟, 流域面积为 45.6 km<sup>2</sup>, 主沟长约 5.2 km, 平均宽约 50 m, 沟床比降较大, 主沟平均底坡在汇流区的山坡为 50~60%, 物质供给区的纵坡是 15~22%, 淤积过渡区 8~10%, 堆积河谷 6~7%, 堆积扇为 5.2%<sup>[1]</sup>。整个流域内松散物质的边坡大多为 35°~38°, 许多基岩边坡在 45°~50°。高山深谷和大的纵坡为泥石流的形成提供了有利的地形条件。

流域内地表组成物质主要是元古代昆阳群的变质板岩及千枚岩, 在分水岭处有少量的震旦纪白云岩、二迭系石灰岩。由于该区属强震分布区, 板岩、千枚岩被挤压、震动得十分破碎。同时沟谷普遍发育有第四系松散堆积物, 这些物质为泥石流的形成提供了充足的物质来源。

流域地属亚热带高原季风气候, 受西南季风影响, 干湿季节明显, 多年平均降雨量为 600~700 mm,

<sup>\*</sup>中国科学院特别支持领域“山地灾害——泥石流、滑坡基础研究”资助项目(编号: 961202)及中国科学院、水利部水土保持研究所博士生经费资助。

收稿日期: 1998—01—24; 改回日期: 1998—05—30。

年降雨 85~90%，集中在 5~10 月。每年 11 月至次年 4 月的干季为泥石流固体物质积聚期，物质经积聚充分后，在雨季便可形成泥石流。

据已有的考察结果<sup>[3,4]</sup>及研究分析，蒋家沟泥石流堆积可分为晚更新世形成的古泥石流堆积和近代泥石流堆积两类。其泥石流发育历史之长、规模之大，是天然泥石流的典型。

## 2 神府—东胜矿区泥石流源地松散体起动人工降雨实验

### 2.1 实验设计及过程

根据泥石流组成物质，选择 4 种物质的裸露斜坡进行人工降雨实验，坡度基于不同物质的休止角而定；受降雨装置的限制，实验径流小区设计规模为 5m×1.5m，周围用铁皮环包，避免降雨流失。经过对神木县、东胜市 1958~1996 年气象水文统计资料分析，选择高频率、短历时、大强度降雨为实验雨强，分别为 2mm/min、1.2mm/min，降雨总量均为 50mm。径流小区的出口处设计三层径流桶，前二桶有九孔，其中一孔注入下层径流桶。

每场降雨实验前测土壤前期含水量，实验过程中记录产流、沟谷形成时刻。隔三分钟在径流出口处取含沙水样及测第二个径流桶水深。实验后测降水入渗深度、土壤含水量。样品经测容积、称重、烘干，计算侵蚀、径流、入渗量。实验统计结果见表 1。

表 1 神府—东胜矿区人为泥石流松散体起动人工降雨模拟试验

Table 1 The experiments of artificial simulation rainfall on the loose accumulated material initiating flow of man-made debris flow in Shenfu-Dongsheng mine area

场次	面积 (m <sup>2</sup> )	坡度 (°)	物质 组成	土壤含水量(%)		雨强 (mm/min)	总雨量 (mm)	总入渗量 (mm)	总径流深 (mm)	总产沙量 (kg)	侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	产流时 刻降雨 mm
				前期	后期							
1	7.5	30	沙黄土	7.50	23.97	1.2	50.4	37.560	12.840	12.633	1684.44	18
2	7.5	30	沙黄土	6.10	20.77	2.0	50.0	28.805	21.195	17.691	2358.76	3
3	7.5	30	人为弃黄土	4.10	16.07	2.0	50.0	26.686	23.315	150.156	20020.00	17
4	7.5	30	人为弃黄土	3.40	21.68	1.2	52.8	25.670	27.130	114.595	15265.96	17
5	7.5	28	沙坡			1.2	50.4	50.400	0.000	0.000	0.000	无
6	7.5	28	沙坡	3.17	19.13	2.0	50.0	43.822	6.178	10.993	1465.73	16
7	7.5	36	弃石渣	8.28	25.37	2.0	50.0	44.913	5.088	2.410	321.34	21
8	7.5	36	弃石渣	18.28	25.77	1.2	48.0	12.392	35.608	1.418	189.03	5
9	7.5	6	人为弃黄土	8.35	27.86	1.2	50.4	40.600	9.800	3.640	485.34	11
10	7.5	6	人为弃黄土	19.52	25.00	2.0	50.0	27.250	22.750	9.344	1245.91	4
11	7.5	40	弃煤渣	8.23	44.85	2.0	50.0			49.143	6552.40	
12	7.5	40	弃煤渣	15.59	39.03	1.2	50.4					

备注：1.第 11、12 场降雨因煤渣渗流严重，故径流区口没有取上样，但细煤渣随渗流侵蚀。第 12 场降雨量出现大煤渣坡整体下滑，最大滑距达 25cm，滑坡坡长 7m，底长 10.8m；  
2.煤浆取样容积 1 000ml，含煤渣 791.43g；  
3.弃石渣泥石流浆取样容积 1 000ml，含石渣 1 513.4g

### 2.2 实验结果分析

由表 1 知：不同物质起动条件不同，同一物质，降雨强度大小不同，其侵蚀量与产流时刻差异很大；同一组成物质，由于人为干扰所造成的侵蚀量相差很大。如表 1 第 2 与第 3 场降雨相比或第 1 与第 4 场降雨相比侵蚀量相差近 9 倍。虽然在弃石渣、煤渣坡上，侵蚀量较小，但降雨期间发生过整体斜坡下滑运动及突发的泥石流现象，泥沙含量可达 1 513.4kg/m<sup>3</sup>。

实验结果表明：降雨强度 I，坡度 α，土壤前期含水量 W，土壤入渗强度 f，松散体堆积物比重 γ，降雨总量 R 等的函数，以侵蚀量 S 作为难易起动的衡量指标，则  $S = G(I, \alpha, \gamma, W, R, f)$ 。

3 神府—东胜矿区泥石流源地松散体起动放水冲刷实验

根据泥石流发生部位, 我们设计两种实验方式。

3.1 坡面型泥石流松散体起动人工放水冲刷实验

此矿区人为泥石流主要是由石料开采和煤田弃渣堆积所致, 故选择煤渣、石渣两种物质的斜坡进行放水实验, 径流小区设计为 1.5m×5m, 放水强度由水表控制在 15L/min 及 9L/min, 场总放水量 378L, 共进行了四场放水实验(见表 2)。

表 2 神府—东胜矿区人为泥石流松散体起动人工放水实验

Table 2 The experiments of artificial setting water rushing on loose accumulated material initiating flow of man-made debris flow in Shenfu-Dongshen mine area

场次	试区面积 (m <sup>2</sup> )	坡度 (°)	物质	放水强度 (L/min)	相当雨量 (mm/min)	放水总量 (L)	产沙量 (kg)	侵蚀模数 (kg/m <sup>2</sup> )
1	7.5	36	石渣	15	2	375	663.1	88.413
2	7.5	40	煤渣	15	2	375	1412.2	188.293
3	7.5	40	煤渣	9	1.2	378	1273.1	169.747
4	7.5	36	石渣	9	1.2	378	1684.6	224.613

3.2 沟谷型泥石流松散体起动人工放水冲刷实验

根据野外泥石流沟调查统计形状分析, 选择具有代表性的泥石流沟形状, 人为模拟修建了一个缩小的模型, 设计标准为: 物源区平均宽 3.5m, 长 6.5m, 坡度 31°, 流通区平均宽 1.2m, 最窄段为 0.8m, 长 6m, 坡度 26°, 主沟道总长为 13m, 沟道相对高差 6.83m。将物源区堆积一定量的石渣、煤矸石、沙、土混合物, 进行放水试验, 流量控制为 0.003m<sup>3</sup>/s, 共进行两场实验, 详细记录了泥石流的形成、消亡过程(表 3)。

表 3 神府—东胜矿区人为泥石流沟道松散体起动人工放水实验

Table 3 The experiments of artificial setting water rushing on the processes of man-made debris flow in Shenfu-Dongsheng mine area

场次	松散体 堆积量 (m <sup>3</sup> )	泥 石 流 过 程				
		开始时刻 (min)	最盛时刻 (min)	稀 性 (min)	洪 水 (min)	停 止 (min)
1	4.2	第 8	第 16~20	第 20~35	第 35 以后	第 45
2	3.15	第 3	第 5~12	第 12~18	第 18 以后	第 31

实验观测结果表明: 1. 石渣最难起动, 几乎全靠崩塌及砾状石渣的下滚运动; 2. 若松散堆积物是沙、土在底层, 石渣在上部, 则通过冲沟两侧石渣崩塌下滚, 泥石流很快形成。若石渣在底部, 沙土在上部一般很难形成泥石流, 即使形成石渣含量也很少, 泥石流过程很短; 3. 泥石流的形成并非需要松散体饱和, 主要靠超渗流高强度冲刷作用形成; 4. 泥石流阵性明显; 5. 泥石流转化为洪水, 主要是由于物源区松散堆积物减少、坡度变缓所致。

4 云南东川蒋家沟泥石流松散体起动放水冲刷实验

由于水、电及潜水泵装置等一系列条件限制, 未能进行人工降雨模拟实验, 只进行了放水冲刷实验。选择四种自然坡面, 不同的土地利用状况, 共进行 8 场放水实验。小区设计为 1.5m×5m, 放水强度控制在 7.5L/min, 及 15L/min, 总放水量分三个等级 900L、450L、726L(表 4)。

表 4 说明了不同的土地利用状况、不同的放水强度所造成的侵蚀量差异很大,第 1、5、6、8 场放水实验,放水强度小,不能将松散体起动,只有当放水强度相当于雨强 2mm/min 时,才能使松散体起动,坡面发生侵蚀。以第 2 与第 3 场放水比较,二者只是土地利用现状不同,其它条件相同,但其侵蚀量相差 7.4 倍,从而也说明开垦荒坡是造成侵蚀严重的主要因素。

观测放水实验过程发现,无论何种物质组成的坡面,土地利用现状如何不同,均出现细沟侵蚀,坡面片蚀,但未见有泥石流发生,也很少出现高含沙水流。这一现象进一步说明,在蒋家沟泥石流发生过程中,坡面侵蚀量所占比重不大。通过对降雨、泥石流过程的观测发现,泥石流固体物质主要来源于降雨中的崩塌、滑坡。

表 4 东川蒋家沟泥石流源地松散体起动人工放水实验

场次	试区面积 (m <sup>2</sup> )	坡度	土地利用	放水强度 (L/min)	相当雨量 (mm/min)	放水总量 (L)	产沙量 (kg)	侵蚀模数 (kg/m <sup>2</sup> )
1	7.5	38°	荒坡地	7.5	1	726	0	0
2	7.5	38°	荒坡地	15	2	900	12.214	1.629
3	7.5	38°	荒坡开垦	15	2	900	66.097	8.813
4	7.5	40°	荒坡除去草石	15	2	900	65.568	8.742
5	7.5	40°	荒坡除去草石	7.5	1	450	0	0
6	7.5	38°	荒坡开垦	7.5	1	450	0	0
7	7.5	40°	堆积荒坡地	15	2	900	32.837	4.378
8	7.5	40°	堆积荒坡地	7.5	1	450	0	0

5 结 论

- 1 蒋家沟自然泥石流固体物质的起动主要靠降雨过程中的崩塌、滑坡重力的惯性与大坡度、快速汇水的推动之合力,固体物质主要来源于暴雨期间斜坡的下滑和崩塌。
- 2 神府—东胜矿区人为泥石流固体物质的起动主要靠大强度降雨、高速汇流的推动力而起动。固体物质来源于弃土石渣,其固结性差、堆积坡度大,所需的起动力小,易发生。
- 3 比较表 2、4 在相同的放水强度、相近的坡度前提下,人为堆积泥沙起动所需水量小而速度快,并且造成的侵蚀大,是自然坡面侵蚀量的几十倍。
- 4 人工模拟泥石流沟谷放水冲刷实验,能系统观测泥石流发生的全过程,寻求泥石流特性变化的原因,分析其运动变化机理,整体性、直观性好。

参 考 文 献

[1] 马蔼乃. 云南东川蒋家沟泥石流流速分析. 中国地理学会: 1977 年地貌学术讨论会文集. 北京: 科学出版社, 1981, 210~214.

[2] 李斌, 陈琴德. 云南东川蒋家沟泥石流发生、发展过程的初步分析. 地理学报, 1979, 34(2): 156~168.

[3] 史正涛, 张林源. 云南小江流域第四纪泥石流及发育环境. 水土保持学报, 1992, 6(4): 14~22.

[4] 雷祥义, 李昭淑. 蒋家沟泥石流堆积物的时代及成因. 山地研究 1993, 11(3): 149~155.

致谢: 感谢中国科学院、水利部成都山地灾害研究所东川泥石流观测研究站全体工作人员及课题组成员对实验研究给予的大力支持。

第一作者简介 张丽萍, 女, 1960 年生, 博士, 副教授。1984 年山西师大地理系毕业留校任教。1990 年获陕西师大地理系自然地理硕士学位。1995 年考入中科院、水利部水土保持研究所攻读博士学位, 导师唐克丽先生, 1998 年毕业。现在南京大学大地海洋科学系博士后工作站。先后参加过“七五”、“八五”重点项目并获奖, 发表有关论文 40 余篇。

## EXPERIMENTS OF ARTIFICIAL SIMULATION RAINFALL AND SETTING WATER INITIATING ACCUMULATED MATERIAL IN DEBRIS FLOW ORIGIN PLACE

ZHANG Li-ping<sup>1</sup> Tang Ke-li<sup>2</sup> Zhang Ping-cang<sup>2</sup> Chen Wen-liang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Pilot Laboratory of Coast and Island Exploitation, Nonjiing University 210093;

<sup>2</sup> Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry  
of Water Conservancy, Yangling Shaanxi 712100)

### Abstract

Through a great deal of experiments of artificial simulation rainfall and setting water rushing in ShenFu-DongSheng mine area and Dong Chuang Jiang Jia Gou debris flow gully, this reserach has induced four results. 1. The initiating of material accumulated by human activity needed relatively small external force and led to large erosion modulus, debris flow is easy to occur; 2. The whole debris flow process could be observed throuth the model simulation experiment of debris flow gully. At present, the experiment method is the best way to analyse debris flow genesis and process; 3. In the debris folw process of Jiang Jia Gou, the accumulation is mainly from hillslide and slope collapsing during torrential rain; 4. Debris flow caused by human activity is easy to occur, but scale is smaller and disaster extent is more serious than that of the natural.

**Key words** debris flow, accumulated material initiating, artifiical simulation rainfall, setting water rushing accumulation experiment