

泥石流危险范围模型实验*

刘希林 张松林

(中国科学院 成都山地灾害与环境研究所)
(水利部)

唐 川 陈 明

(云南省地理研究所)

提 要: 通过在云南东川蒋家沟现场小規模泥石流堆积过程的68回次标准模型实验, 本文探讨泥石流最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积与泥石流供给方式、堆积区坡度、流通区坡度和泥石流容重的相互关系。得出了特定控制参数下, 泥石流危险范围的各类计算公式。

主题词: 泥石流 危险范围 模型实验

泥石流(堆积扇)危险范围是指泥石流冲出沟口后可能堆积的最大范围。泥石流堆积是其对社会环境的主要威胁和危险所在。危险范围的预测具有重要的实践和理论意义。

模型实验是进行泥石流研究的重要手段。国外已见的工作, 如日本京都大学防灾研究所和建设省土木研究所砂防部等单位研究泥石流堆积机理, 计算机模拟泥石流泛滥范围, 丰富了泥石流沉积动力学的内容^[1,2]。国内的研究, 如: 王兆印等通过在铺满卵石的陡槽上释放不同浓度不同流量的泥浆或清水, 研究泥石流的形成条件和运动规律^[3]。崔鹏从沟床坡度、细粒物质含量和水分饱和度三方面入手, 采用直斜式小型模拟实验装置, 探讨泥石流的起动条件^[4]。孟河清等通过对大秦铁路化石沟泥石流的模拟实验, 探讨泥石流对铁路桥渡的影响和应采取的防护措施。周必凡等通过对云南东川蒋家沟粘性泥石流运动参量之间相互关系的分析, 建立了泥石流表面流速的计算公式^[5]。但是, 有关泥石流堆积扇危险范围的模型实验尚不多见。本文是这方面工作的阶段性成果。

1 实验材料与方 法

泥石流危险范围的小型模型实验在云南东川蒋家沟泥石流现场进行。1991年9月1日蒋家沟暴发泥石流, 4日我们取下游沟床残留泥样(样品I)作为实验材料。6日晚10时至

本文1992年5月14日收到, 10月4日收到修改稿。

*国家自然科学基金资助项目(49000011)和云南省科委应用基础研究基金资助项目(90D063)的阶段性成果。

12时该沟又暴发泥石流,次日晨再取沟床新鲜残留泥样(样品Ⅱ)作为实验材料。取样时将粒径大于20mm的卵石剔除。实验所用的样品均为粘性泥石流,中值粒径分别为0.8mm(样品Ⅰ)和1.7mm(样品Ⅱ)。样品粒度分析结果见图1。

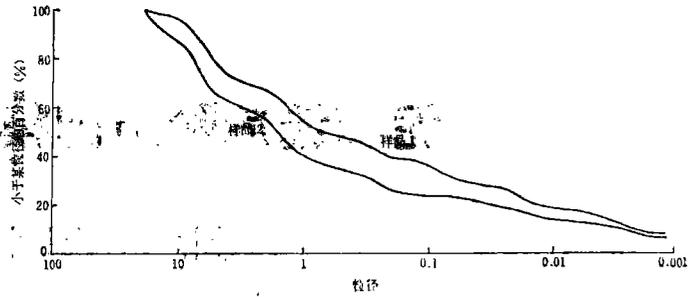


图1 实验所用泥石流样品的颗粒级配
Distribution of grain size used in the experiment

模型实验装置由三部份组成: 1. 泥石流供给箱为一内边长46.2cm的立方体, 底边面积2134.44cm², 最大容积98611cm³, 可装载泥石流流体约200kg(以泥石流容重2g/cm³计), 侧边开有一直径5cm的供给孔, 由闸板开关控制泥石流的供给。供给箱由一固定架支撑。2. 泥石流流通槽为一内宽15.8cm、内高18cm、有效流动长度150cm的矩形槽。流通槽由一活动架支撑, 可前后移动而调整流通槽坡度, 坡度调整范围为10—34度。3. 泥石流堆积板为一宽150cm、长230cm的平板。平板以10cm为间距标有300个方格以测定泥石流堆积。沿中轴线每间隔20cm钉入一有效长10cm的铁钉11颗以测定泥石流堆积厚度, 后改用20cm刻度钢尺逐点量测。堆积板直接放置于实验场地, 坡度可任意调整。堆积板与流通槽以斜口方式平整相接。为保持泥石流流出, 供给箱后具有一定能量但又不过多飞溅而损失供给量, 流通槽与供给孔互不接触, 相距10—30cm, 实验装置均为刨光木质结构, 全部实行手动操作。

因粘性泥石流有明显的铺床现象, 故在每次实验开始时都补给相同容重的泥石流流体让其自然完成铺床过程(这部份泥石流流体不计入供给量), 以避免因流通槽粘附泥石流流体而影响供给量。模型实验共分5项, 下节分别讨论。

2 实验结果与讨论

2.1 实验 1. 泥石流冲出物总量与危险范围的关系(连续堆积)

实验目的是为了探讨泥石流堆积扇的发展过程和在原堆积扇上泥石流冲出物总量与最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积之间的关系。实验所用泥石流流体为样品Ⅱ, 加水稀释后容重为1.82g/cm³。采用的控制参数为流通槽坡度15度, 堆积板坡度5度。实验共设10个回次。每次堆积过程完全停止后, 测量最大堆积长度、最大堆积宽度和0至10号位的堆积厚度, 并描下堆积扇平面图形, 然后再进行第二回次的实验。实验结果见表1和图2。最大堆积厚度第1、2回次实验中出现于0号位, 第3—5回次出现于2号位, 第6—10回次出现于3号位处。

表 1 泥石流冲出物总量与危险范围相互关系的模型实验资料
Relationships between the total sediment of debris flow and
the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
冲出物总量 $V_c(\text{cm}^3)$	2 600	5 200	7 800	10 400	13 000	15 600	18 200	20 800	23 400	26 000
最大堆积长度 $L(\text{cm})$	90	110	122	136	143	148	152	153	154	155
最大堆积宽度 $B(\text{cm})$	52	71	80	89	93	98	103	107	109	110
最大堆积厚度 $T(\text{cm})$	1.1	1.3	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.2	3.6	3.8
堆积面积 $S(\text{cm}^2)$	3 520	5 690	7 330	9 280	10 120	11 120	12 150	12 720	12 780	13 280

0号—7号位堆积区厚度资料，删。——编者

实验结果表明，最大堆积长度与冲出物总量有下列定量关系：

$$L = -143.3387 + 29.8536 \ln V_c \quad (1)$$

相关系数 $r = 0.9883$ ，回归方程显著。

式中 L ：泥石流最大堆积长度(m)；

V_c ：泥石流冲出物总量 (m^3)。

本式适用范围：泥石流容重 $1.82\text{g}/\text{cm}^3$ ，堆积区坡度 5 度。

最大堆积宽度与冲出物总量有下列定量关系：

$$B = -149.0417 + 25.6293 \ln V_c \quad (2)$$

相关系数 $r = 0.9989$ ，回归方程显著。

式中 B ：泥石流最大堆积宽度

(m)； V_c 和本式适用范围同式

(1)。

最大堆积厚度与冲出物总量有下列定量关系：

$$T = 0.7067 + 0.0001 V_c \quad (3)$$

相关系数 $r = 0.9977$ ，回归方程显著。式中 T ：泥石流最大堆积厚度 (m)； V_c 和本式适用范围

同式 (1)。

堆积面积与冲出物总量有下列定量关系：

$$S = -32491.0952 + 4511.5653 \ln V_c \quad (4)$$

相关系数 $r = 0.9942$ ，回归方程显著。式中 S ：泥石流堆积面积(m^2)； V_c 和本式适用范围同

式 (1)。

式 (1) 和 (2) 表明泥石流最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积与冲出物总量呈非

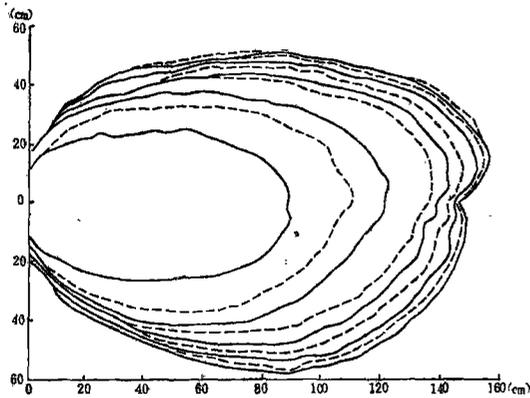


图 2 粘性泥石流堆积扇的危险范围和发展过程
(原始堆积区坡度 5 度)

Relationships between the total sediment of
debris flow and the risk range of debris fan

线性自然对数函数关系,即L、B和S开始时随Vc的增加而很快增大,到一定程度后速度变慢,最后趋于稳定,此时增加的Vc不足以扩散到扇的四周而仅用于增加扇的厚度。式(3)表明泥石流最大堆积宽度与冲出物总量呈线性直线函数关系,但斜率很小,即T随Vc的增加而缓慢增大。

2.2 实验 2. 泥石流一次冲出量与危险范围的关系(不连续堆积)

实验目的是为了探讨新生泥石流堆积扇的形成过程和泥石流一次冲出量与最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积之间的关系。实验所用石流体为样品II,容重为 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$ 。采用的控制参数为流通槽坡度15度,堆积板坡度5度。实验共设计11个回次,每次实验完成后用水冲掉堆积物,在堆积板保持与上次实验基本相同的光洁度和干湿度的条件下,改变泥石流供给量,再进行下一次实验。实验结果见表2。最大堆积厚度在第7、8、11实验回次中出现于4号位处,其余均在0号位处。

实验结果表明,最大堆积长度与一次冲出量有下列定量关系:

$$L = 50.3727 + 0.0059V \quad (5)$$

相关系数 $r = 0.9743$,回归方程显著。式中V:泥石流一次冲出量(m^3);L同前;本式适用范围:泥石流容量重 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$,堆积区坡度5度。

最大堆积宽度与一次冲出量有下列定量关系:

$$B = 39.9091 + 0.0035V \quad (6)$$

相关系数 $r = 0.9799$,回归方程显著。B和V同前,本式适用范围同式(5)。

表2 泥石流一次冲出量与危险范围相互关系的模型实验资料

Relationships between the sediment of debris flow and the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
一次冲出量V(cm^3)	2 680	4 020	5 360	6 700	8 040	9 380	10 720	12 060	13 400	14 740	16 080
最大堆积长度L(cm)	61	74	82	89	94	113	123	128	126	126	145
最大堆积宽度B(cm)	43	51	58	68	70	74	78	83	88	87	93
最大堆积厚度T(cm)	1.9	2.0	2.1	2.4	2.3	2.0	2.1	2.0	2.4	2.6	2.4
堆积面积S(cm^2)	2 424	3 345	3 645	4 535	5 150	6 305	7 160	8 020	8 670	8 365	11 045

0号—8号位堆积区厚度资料,删。——编者

堆积面积与一次冲出量有下列定量关系:

$$S = 682.4091 + 0.5925V \quad (7)$$

相关系数 $r = 0.9852$,回归方程显著。S和V同前,本式适用范围同式(5)。

最大堆积厚度与一次冲出量为随机关系，后者对前者无多大影响。式(5)、(6)和(7)表明最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积与一次冲出量呈线性直线函数关系，即L、B和S均随V的增加而匀速增大。

2.3. 实验3. 泥石流堆积区坡度与危险范围的关系

实验目的是为了探讨堆积区坡度对危险范围的影响。实验所用泥石流为样品I，容重为 2.03g/cm^3 。采用的控制参数为每次定量供给泥石流 6318cm^3 ，流通槽坡度15度。实验共设11个回次，堆积板坡度从0度开始，每次上调1度，最大至10度。实验结果见表3。最大堆积厚度均出现于0号位处。

实验结果表明，最大堆积长度与堆积区坡度有下列定量关系：

$$L = 53.5455 + 6.8909G \quad (8)$$

相关系数 $r = 0.9921$ ，回归方程显著。式中G：泥石流堆积区坡度(度)；L同前。本式适用范围：泥石流容重为 2.63g/cm^3 ，泥石流一次冲出量为6318个数量级(cm^3 或 m^3 等)。

表3 泥石流堆积区坡度与危险范围相互关系的模型实验资料

Relationships between the gradient of depositional area of debris flow
and the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
堆积区坡度G(度)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大堆积长度L(cm)	50	60	70	78	81	85	96	106	105	113	124
最大堆积宽度B(cm)	92	76	79	69	71	70	55	60	63	60	65
最大堆积厚度T(cm)	4.5	4.0	2.9	3.6	3.1	2.7	2.4	2.1	2.3	2.2	1.9
堆积面积S(cm^2)	3763	3756	4458	4422	4692	4618	5224	4990	5399	5335	6352

0号—7号位堆积区厚度资料，删。——编者

最大堆积宽度与堆积区坡度有下列定量关系：

$$B = 81.8636 - 2.5545G \quad (9)$$

相关系数 $r = -0.8104$ ，回归方程显著。B和G同前，本式适用范围同式(8)。

最大堆积厚度与堆积区坡度有下列定量关系：

$$T = 4.0500 - 0.2336G \quad (10)$$

相关系数 $r = -0.9212$ ，回归方程显著。T和G同前，本式适用范围同式(8)。

堆积面积与堆积区坡度有下列定量关系：

$$S = 3743.0455 + 214.7000G \quad (11)$$

相关系数 $r = 0.9470$ ，回归方程显著。S和G同前，本式适用范围同式(8)。

式(8)和(11)表明泥石流最大堆积长度和堆积面积与堆积区坡度呈线性直线正相关，即L和S随G的增加而匀速增大。式(9)和(10)表明泥石流最大堆积宽度和最大堆积

厚度与堆积区坡度呈线性直线负相关, 即B和T随G的增加而匀速减小。

2.4. 实验4. 泥石流流通区坡度与危险范围的关系

实验目的是为了探讨泥石流流通区坡度对危险范围的影响。实验所用泥石流流体为样品II, 实验分二组, 第一组(实验4A)的控制参数为每次定量供给泥石流 7700cm^3 , 泥石流容重 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$, 第二组(实验4B)的控制参数为每次定量供给泥石流 8850cm^3 , 泥石流容重 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$ 。堆积板坡度均为5度。实验各设13个回次, 流通槽坡度从10度开始, 每次上调2度, 最大至34度, 实验结果见表4、表5。在实验4A中, 最大堆积厚度在第1、14回次中出现于1号位处, 第11回次出现于2号位, 其余10个回次均出现于4号位处。在实验4B

表4 泥石流流通区坡度与危险范围相互关系的模型实验资料(实验4A)
Relationships between the gradient of flow section of debris flow
and the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
流通槽坡度D(度)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
最大堆积长度L(cm)	141	153	140	145	156	143	167	142	142	149	152	140	132
最大堆积宽度B(cm)	59	63	79	76	73	67	62	67	73	69	60	65	68
最大堆积厚度T(cm)	1.3	1.5	1.2	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4
堆积面积S(cm^2)	8317	8655	8526	8022	8057	7524	7454	7410	7492	7412	7182	6928	8392

0号—9号位堆积区厚度资料, 删。——编者

表5 泥石流流通区坡度与危险范围相互关系的模型实验资料(实验4B)
Relationships between the gradient of flow section of debris flow
and the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
流通槽坡度D(度)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
最大堆积长度L(cm)	69	79	89	95	92	93	82	82	86	84	90	92	88
最大堆积宽度B(cm)	65	66	64	65	68	69	61	60	59	64	67	63	63
最大堆积厚度T(cm)	3.1	2.6	2.2	2.2	2.3	2.1	2.8	2.7	2.6	2.7	2.6	2.5	2.6
堆积面积S(cm^2)	3530	4305	4796	5267	5067	5346	3939	3971	4037	4338	4739	4618	4483

0号—5号位堆积区厚度资料, 删。——编者

中，最大堆积厚度在第 6、11、13 回次中出现于 1 号位，第 5、9 回次出现于 2 号位，其余 8 个回次均在 0 号位。

实验结果表明，无论泥石流容量大小和一次冲出量多少，其最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积与流通槽坡度均为随机关系，即流通区坡度对危险范围无多大影响。

2.5. 实验 5. 泥石流容重与危险范围的关系

实验目的是为了探讨泥石流容重对危险范围的影响。实验所用泥石流流体为样品 II。采用的控制参数为每次定量供给泥石流 7700 cm^3 流通槽坡度 15 度，堆积板坡度 5 度。实验共设 10 个回次，泥石流容重变化于 $2.20-1.62 \text{ g/cm}^3$ 。最大堆积厚度均出现于 0 号位处。实验结果见表 6。

表 6 泥石流容重与危险范围相互关系的模型实验资料
Relationships between the unit weight of debris flow and
the risk range of debris fan

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
泥石流容重 R (g/cm^3)	2.20	2.07	2.00	1.92	1.84	1.79	1.76	1.72	1.66	1.62
最大堆积长度 L (cm)	47	74	90	110	132	149	172	158	185	230
最大堆积宽度 B (cm)	57	72	70	63	59	64	64	65	61	65
最大堆积厚度 T (cm)	4.5	4.0	2.5	1.9	1.7	1.9	2.0	1.8	2.3	1.9
堆积面积 S (cm^2)	2 038	4 052	5 002	5 620	6 142	6 530	8 435	7 517	9 116	12 337

0 号—10 号位堆积区厚度资料，删。——编者

实验结果表明，最大堆积长度与容重有下列定量关系：

$$L = 472.4365 - 549.1345 \ln R \quad (12)$$

相关系数 $r = -0.9802$ ，回归方程显著。式中 R：泥石流容重 (g/cm^3)；L 同前。本式适用范围：堆积区坡度 5 度，泥石流一次冲出量 7700 个数量级 (cm^3 或 m^3)

最大堆积厚度与容重有下列定量关系：

$$T = -5.4920 + 4.2745R \quad (13)$$

相关系数 $r = 0.8127$ ，回归方程显著。T 和 R 同前。本式适用范围同式 (12)。

堆积面积与容重有下列定量关系：

$$S = 23556.3260 - 27441.4459 \ln R \quad (14)$$

相关系数 $r = -0.9457$ ，回归方程显著。S 和 R 同前。本式适用范围同式 (12)。

最大堆积宽度与容重为随机关系，后者对前者无多大影响。式 (12) 和 (14) 表明最大堆积长度和堆积面积与容重呈负相关的非线性自然对数函数关系，即 L 和 S 开始时随着 R 的增加而很快减小到一定程度后速度变慢，最后趋于稳定。式 (13) 表明最大堆积厚度与容重呈线性直线函数关系，即 T 随 R 的增加而匀速增大。

3 结 论

1. 在泥石流连续堆积的条件下,最大堆积长度和最大堆积宽度和堆积面积与冲出物总量为正相关的非线性自然对数函数关系。最大堆积厚度与冲出物总量为正相关的线性直线函数关系。当泥石流容重为 $1.82\text{g}/\text{cm}^3$,堆积区坡度为5度时,危险范围可表达为本文公式(4)。

2. 在泥石流不连续堆积的条件下,最大堆积长度、最大堆积宽度和危险范围与一次冲出量均为正相关的线性直线函数关系。最大堆积厚度与一次冲出量关系不密切。当泥石流容重为 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$,堆积区坡度为5度时,危险范围由本文公式(7)表达。

3. 泥石流最大堆积长度和危险范围与堆积区坡度为正相关的线性直线函数关系。最大堆积宽度和最大堆积厚度与堆积区坡度为负相关的线性函数关系。当泥石流容重为 $2.03\text{g}/\text{cm}^3$,一次冲出量为 63.8cm^3 时,危险范围可由本文公式(11)表达。

4. 无论泥石流容重大小和一次冲出量多少,其最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和危险范围与流通区坡度关系均不密切。

5. 泥石流最大堆积长度和危险范围与泥石流容重为负相关的非线性自然对数函数关系。最大堆积厚度与容重为正相关的线性直线函数关系。最大堆积宽度与容重关系不密切。当堆积区坡度为5度,一次冲出量为 7700cm^3 时,危险范围可表达为本文公式(14)。

致谢:本研究在中国科学院东川泥石流观测研究站的大力支持和协助下完成,参加模型实验的还有东川站的王玉章和汪凯同志,东川站刁惠芳同志完成实验所用泥石流样品的粒度分析工作,统志于此,谨表谢意。

参 考 文 献

- (1) 石川芳治、水山高久、井户清尾.堆积扇上泥石流泛滥堆积机理,泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会文集,A卷,泥石流,中国四川峨眉,1991,27-31
- (2) 水山高久、北原一平、原義文:土石流氾濫シミュレーションモデルにする土石流対策工の効果评价,新砂防,1988,40(5):14-17(日文)。
- (3) 王兆印、张新玉.水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究,地理学报,1989,44(3):291-301
- (4) 崔鹏.泥石流起动条件及机理的实验研究.科学通报,1991,21:1650-1652
- (5) 周必凡、李德基、罗德富、吕儒仁、杨庆溪.泥石流防治指南,北京:科学出版社,1991,98-108

A PRELIMINARY RESEARCH ON THE MODEL EXPERIMENTS OF THE RISK RANGE OF DEBRIS FAN

Liu Xilin Zhang Songlin

(Institute of Mountain Disasters and Environment, Chinese Academy of Sciences)

Tang Chuan Cheng Ming

(Yunnan Institute of Geography)

Subject terms: Debris flow, Risk range, Model experiment

Abstract

By the way of small-scale model experiments of debris flow in the Jiangjia gou, Dongchuan City of Yunnan Province, five groups of 63 times of standard experiments have been conducted, and the results have given the relationships among the maximum length, width, thickness, risk range of debris fan and the supply modes of debris flow (continuous and intermittent supply), gradients of depositional area and flow section as well as unit weights of debris flow. Under the specific experimental parameters, four types of the formulae to calculate the risk range of debris fan are presented. The important conclusions are as follows.

1. Under the circumstance of the continuous accumulation of debris flow, the relationships between the maximum length, width and the risk range of debris fan and the total sediment of debris flow are positively related, and can be expressed as the natural logarithmic functions. The relationship between the maximum length of debris fan and the total sediment of debris flow is positively related, too, and can be expressed as the linear function.

2. Under the condition of the intermittent supply of debris flow, the relationships between the maximum length, width, risk range of debris fan and a debris flow supply are positive linear functions, while the relationship between the thickness of debris fan and a debris flow supply is not close.

3. The relationships between the maximum length, risk range of debris fan and the gradients of depositional area are positive linear function. The relationships between the maximum width, thickness of debris fan and the gradients of depositional area are negative linear functions.

4. No matter how the unit weight and supply of debris flow are, the maximum length, width, thickness and risk range of debris fan all have a stochastic relationship with the gradients of flow section of debris flow.

5. The relationships between the maximum length, risk range of debris fan and the unit weight of debris flow are negatively related, and can be written as the natural logarithmic functions. The relationship between the maximum thickness of debris fan and the unit weight of debris flow is positively related, and can be written as a linear function. The maximum width of debris fan and the unit weight of debris flow have not a good relationship.