

文章编号: 1008-2786-(2011)2-226-08

粘性泥石流沟口回淤实验研究

柳金峰^{1,2}, 游勇^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 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: 泥石流在堆积区进行堆积时,常在沟口形成回淤并造成灾害。为了探讨泥石流在沟口回淤的发展过程、影响因素及其预测,开展了 4组 107次泥石流连续堆积和 4组共 21次单次堆积实验。实验结果表明,粘性泥石流在沟口回淤的发展过程中,累积回淤长度与泥石流累积总量呈线性正相关,相对累积回淤坡度与泥石流累积总量呈对数负相关,根据相对累积回淤坡度的变化将粘性泥石流沟口回淤的发展过程分为三个阶段;在泥石流总量相同的情况下,回淤长度随泥石流重度增大而呈线性增大,随堆积区坡度增大而呈线性减小,随流通区坡度增大而成对数减小。相对回淤坡度随泥石流重度的增大呈线性减小,随堆积区坡度增大而呈线性增大,随流通区坡度增大而呈线性增大;在泥石流总量不同的情况下,随泥石流总量的增大,其沟口回淤长度随之呈线性增大,而相对回淤坡度随之呈线性减小;在粘性泥石流沟口回淤发展过程及其影响因素分析的基础上,采用多元线性回归的方法,建立了粘性泥石流在连续堆积及单次堆积情况下沟口回淤的经验预测公式。

关键词: 粘性泥石流;沟口回淤;实验研究;回淤长度;相对回淤坡度

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流是由暴雨、冰川消融等外在因素触发,对人类的生命和财产安全造成严重危害的一种自然灾害,是我国的主要自然灾害之一。粘性泥石流作为一种高浓度的固液气三相混合流体,由于它的暴发突然,来势凶猛,破坏力强,以冲刷、淤埋为主要危害方式,严重地影响山区人民生命财产建设和经济建设发展^[1-2]。粘性泥流流出山口后进入堆积场所开始堆积,常会在沟口处向上游方向发生回淤,造成严重的危害,例如甘肃白龙江左岸的火烧沟,1969年暴发泥石流,最大淤积厚度达 5.0 m,沟口的排导槽被淤平失效^[3-4];康志成等根据大桥河泥石流冲淤的野外调查和访问发现,在 1919—1939 年间,泥石流活动频繁(每年数十次),大量泥沙在原堆积扇附近发生差异性淤积,下部淤高约 150 m,顶部淤高约 70 m,向主沟回淤约 700 m^[5-6];1981—06—30 云南东川达德沟暴发泥石流,泥石流在沟口形成面积约

0.53 km² 的大型堆积扇的同时,向沟内回淤近 1 km^[7]。沟口回淤常对泥石流防治工程如排导槽的入口造成一定危害,《城市防洪工程设计规范》(CJJ 50—92)中就明确指出排导槽沟口应避免扇形地发育的回淤影响^[8]。目前关于泥石流沟口回淤的研究多集中在对泥石流暴发后的定性研究上^[1,8],较少对沟口回淤开展定量的研究。本文通过室内模拟实验,对泥石流沟口回淤的发展过程、影响因素及预测进行了分析和探讨。

1 实验设计

1.1 实验装置

模拟实验在中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室进行,实验装置包括料斗、水槽、堆积板和物料回收池四大部分(图 1)。1.料斗:长 50 cm,宽

收稿日期 (Received date): 2010-10-30; 改回日期 (Accepted): 2011-01-05。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (编号: 40971014 和 40901008)。 [Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40971014 and 40901008).]

作者简介 (Biography): 柳金峰 (1979—), 男, 安徽泾县人, 助理研究员, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。 [Liu Jinfeng (1979—), male research assistant engaged in the experiment and mitigation research of mountain hazards]

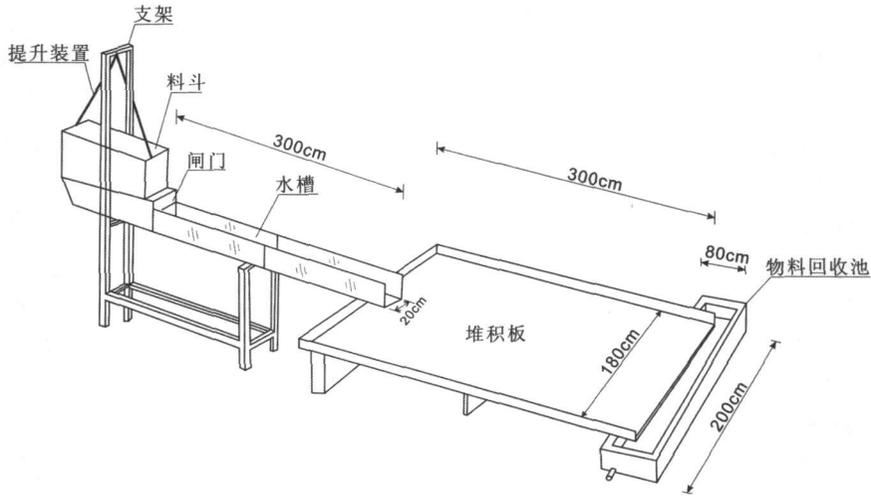


图 1 实验装置示意图

Fig 1 Experimental apparatus

40 cm, 高 85 cm, 可装载泥石流流体约 0.1 m^3 ; 2. 水槽: 为一内宽 20 cm, 内高 30 cm, 有效流动长度为 300 cm 的钢架结构, 侧面为钢化玻璃以便于观测。水槽的坡度调节范围为 $0 \sim 20^\circ$; 3. 堆积板: 为一长 300 cm, 宽 180 cm 的矩形钢架结构, 表面以平整的木板作为堆积平面; 4. 物料回收池: 位于堆积板末端, 为一长 200 cm, 宽 80 cm, 高 15 cm 的砖砌矩形池, 每次实验完成后, 将物料清扫入回收池进行沉淀、回收。

1.2 实验物料

蒋家沟是典型的泥石流流域, 位于云南省的北部东川, 系长江上游金沙江一级水系小江右岸的一条支流, 实验物料来源于蒋家沟沟口附近沟道内采集回来的泥石流原样, 泥石流原样级配很宽, 包含了粘粒、粉粒、砂砾和砾石等组分, 本实验物料最大粒径为 10 mm (图 2)。

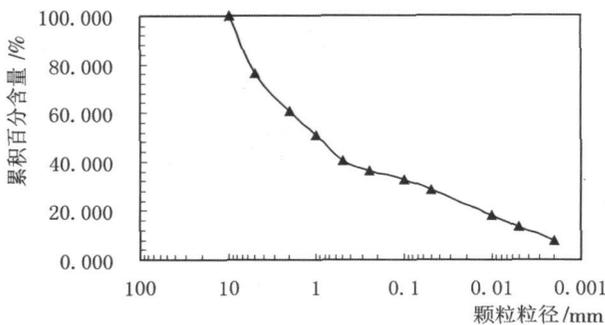


图 2 实验物料颗粒级配图

Fig 2 Particle gradation for the material used in the experiment

1.3 实验内容及参数定义

实验设计包括连续堆积和单次堆积。连续堆积即后一次在前一次堆积的基础上堆积, 相当于阵性泥石流的多次连续堆积; 单次堆积即一次泥石流堆积, 每次实验是在无泥石流堆积物的堆积板上开展。对于连续堆积实验, 实验设定每次的泥石流总量 V 相等 (都为 5000 cm^3)。本文共开展了不同泥石流流方量、重度和不同堆积区坡度条件、不同水槽坡度条件下的泥石流连续堆积实验共 4 组 107 次, 单次堆积实验共 4 组 21 次。具体实验条件的设定见表 1。

图 3 定义了相关参数。图中, θ_u 表示水槽的坡度, θ_d 表示堆积区的坡度, L_u 表示沟口回淤的长度,

表 1 实验条件及组次表

Table 1 Experimental conditions

实验组号	总量 / 10^3 cm^3	重度 γ_m / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	流通区坡度 $\theta_u / ^\circ$	堆积区坡度 $\theta_d / ^\circ$	次数 / 次	备注
A	5	19.6	12	2	15	
B	5	17.6~19.6	12	0	24	连续堆积实验
C	5	19.6	12	0, 2, 4, 5	44	
D	5	19.6	8, 10, 12	0	24	
E	10, 20, 30, 40, 50, 60	19.6	12	2	6	单次堆积实验
F	15	17.6, 18.1, 18.6, 19.1, 19.6, 20.6	12	0	6	
G	20	19.6	12	0, 2, 4, 5, 7	5	
H	5	19.6	6, 8, 10, 12	0	4	

φ 表示相对回淤坡度(真正意义上的回淤坡度应为回淤线与水平线的夹角,本文为了更加清晰地分析扇状地发展过程中沟口回淤的情况,将回淤线与水槽的夹角定义为相对回淤坡度,对于连续堆积实验情况下,为相对累积回淤坡度)。

模拟实验整个过程采用手动操作。遵循实验要求,将泥石流样品装入泥石流池中,然后加水到池中浸泡以备实验使用。实验开始时,取实验要求的泥石流样品,配置成实验所需的重度,搅匀称重后,倒入料斗中,通过反复的搅拌使泥石流流体达到均匀,按实验要求调节补给箱闸门开口的大小,在水槽和堆积板一侧各放置一台数码摄像机摄下泥石流在水槽和堆积板上运动的整个实验过程,待泥石流在堆积板上稳定后,测量所需的实验数据。

2 主要实验结果分析

2.1 粘性泥石流沟口回淤发展过程

以表 1 中 A 组的 15 次连续堆积实验来分析沟

口回淤的发展过程。将水槽和堆积板中心线 15 次实验测量的堆积厚度点绘成图 4 将此 15 次实验的累积回淤长度和相对累积回淤坡度与连续堆积泥石流累积总量的关系点绘成图 5。

从图 4、图 5 可知,可将沟口回淤的发展过程分为三个阶段。第 1 阶段(泥石流累积总量 $5\,000 \sim 35\,000 \text{ cm}^3$),泥石流开始在沟口出现回淤,其累积回淤长度随泥石流累积冲出总量的增大呈线性增大(从 60 mm 增大到 320 mm)。相对累积回淤坡度介于 $20.0\% \sim 40.0\%$,呈对数递减,其递减率为 1.24% ;第 2 阶段(泥石流累积总量 $35\,000 \sim 60\,000 \text{ cm}^3$),累积回淤长度仍然呈线性增大(从 360 mm 增大到 450 mm)。相对累积回淤坡度介于 $18.44\% \sim 19.69\%$,继续呈对数减小,但是递减率大幅下降(0.13%),明显小于第一阶段的下降幅度;第 3 阶段(泥石流累积总量 $60\,000 \sim 75\,000 \text{ cm}^3$),虽然累积回淤长度仍然在增大,但是相对回淤坡度变幅较小($17.79\% \sim 17.92\%$),其递减率为 0.03% ,基本无变化,此时相对累积回淤坡度进入一个稳定阶段。

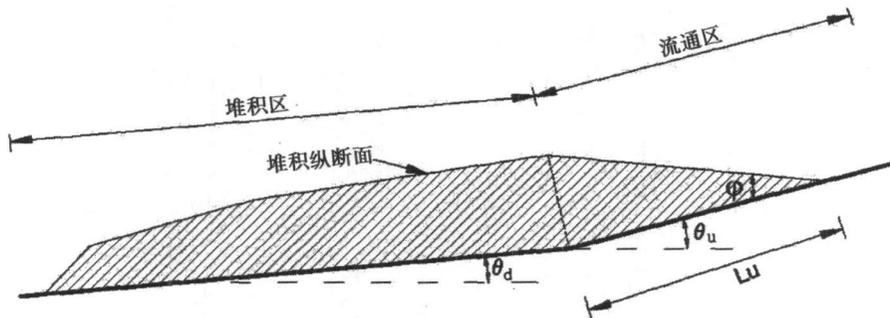
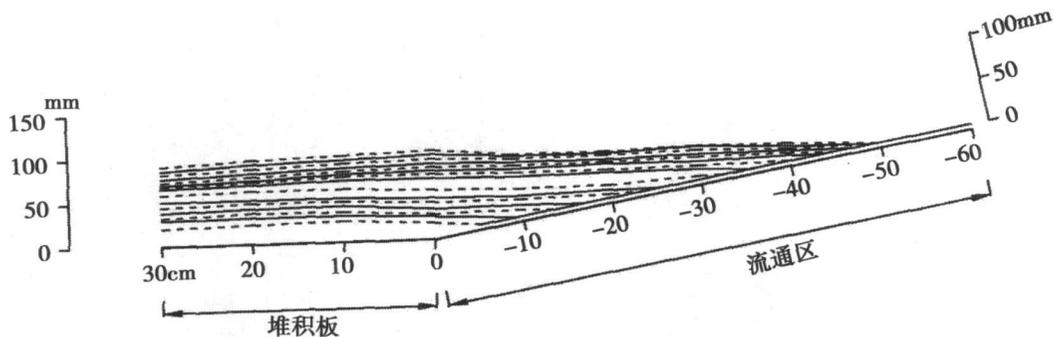


图 3 相关参数定义

Fig. 3 Definition of related parameters



(注:图中从下至上分别为第 1 次~第 15 次实验的堆积表面线,虚线为奇数次,实线为偶数次)

图 4 粘性泥石流扇状地沟口回淤发展过程

Fig. 4 The development of the back siltation of viscous debris flow

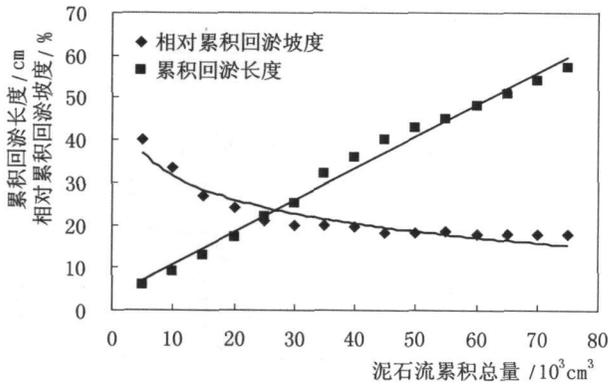


图 5 沟口累积回淤长度和相对累积回淤坡度发展过程图

Fig 5 The development of the accumulative length and relative accumulative slope of back siltation

从图 5 可知, 随泥石流累积总量的增大, 累积回淤长度随之而呈线性增大, 相对累积回淤坡度随之而呈对数减小, 并趋于稳定。对图 5 中累积回淤长度 (L_u) 和相对累积回淤坡度 (φ_a) 与泥石流累积总

量 V_a 的关系进行拟合, 拟合结果如下

$$L_u = 0.75V_a + 3.09 \quad R^2 = 0.98$$

$$\varphi_a = -8.07\ln(V_a) + 50.03 \quad R^2 = 0.91$$

2.2 粘性泥石流沟口回淤影响因素

2.2.1 泥石流重度与沟口回淤关系

以表 1 中 B 组的三种重度条件下共 24 次连续堆积实验及 F 组 6 种重度条件下共 6 次单次堆积实验来分析泥石流重度对沟口回淤的影响 (图 6、图 7)。

从图 6a 和图 7a 可知, 不同重度条件下泥石流沟口回淤的发展符合上述规律, 即随泥石流累积总量的增大, 沟口回淤的累积回淤长度随之呈线性增大, 相对累积回淤坡度随之呈对数减小。在泥石流累积总量相同的情况下, 随泥石流重度的增大, 其沟口回淤的长度随之呈线性增大, 而相对回淤坡度呈线性减小 (图 6b 和图 7b)。将回淤长度 (L_u)、相对回淤坡度 (φ) 与重度 (γ_m) 的关系拟合如下

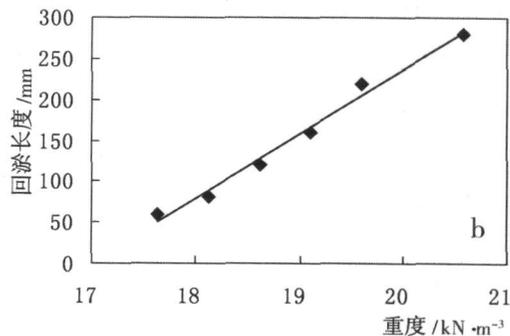
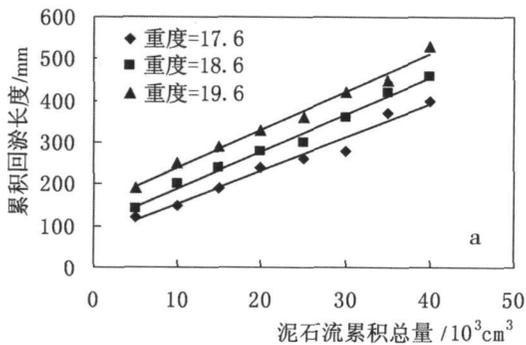


图 6 不同重度条件下泥石流回淤长度对比 (a. 连续堆积; b. 单次堆积)

Fig.6 The comparison of back siltation length in different debris flow densities (a. continuous deposition; b. single deposition)

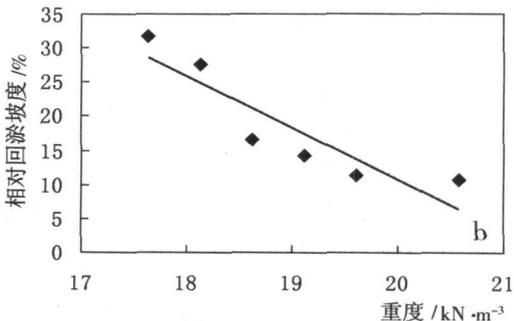
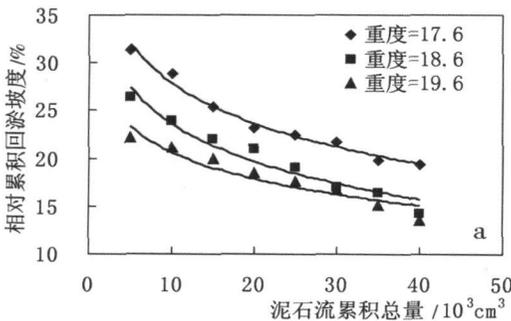


图 7 不同重度条件下相对回淤坡度对比 (a. 连续堆积; b. 单次堆积)

Fig.7 The comparison of relative back siltation slope in different debris flow densities (a. continuous deposition; b. single deposition)

$$Lu = 79.3 \theta_a - 1349.1 \quad R^2 = 0.98$$

$$\varphi = -7.5 \theta_a + 160.83 \quad R^2 = 0.82$$

2.2.2 泥石流总量与沟口回淤关系

连续堆积情况下泥石流累积总量与沟口回淤的关系,已在上述沟口回淤发展过程中进行了分析,在此不在详述。针对单次泥石流堆积,以表 1中 E组的 6种不同泥石流冲出总量条件下的实验来进行分析。将此组 6次实验的回淤长度、回淤坡度与泥石流总量的关系点绘成图 8。

从图 8中可知,随泥石流总量的增大,其沟口回淤长度随之呈线性增大,而相对回淤坡度随之呈线性减小,但是这种减小的幅度很小,如当泥石流总量等于 10 000 cm³ 时,其相对回淤坡度为 18.0%,当泥石流总量等于 60 000 cm³ 时,其相对回淤坡度为 15.4%。将回淤长度 (Lu)、相对回淤坡度 (φ)与泥石流总量 (V)的关系拟合如下

$$Lu = 1.43 V + 186.67 \quad R^2 = 0.86$$

$$\varphi = -0.05 V + 18.62 \quad R^2 = 0.86$$

2.2.3 堆积区坡度与沟口回淤关系

以表 1中 C组的 4种堆积区坡度条件下共 44

次连续堆积、G组 5种堆积区坡度条件下的单次堆积实验来分析堆积区坡度对沟口回淤的影响(图 9、图 10)。

从图 9a图 10a可知,不同堆积区坡度条件下泥石流沟口回淤的发展符合上述规律。在泥石流总量相同的情况下,堆积区坡度越大,其沟口回淤长度呈线性减小,沟口回淤相对坡度呈线性增大(图 9b和图 10b)。如当堆积区坡度为 0°时,其沟口回淤长度为 220 mm,相对回淤坡度为 19.1%;堆积区坡度为 4°时,其沟口回淤长度为 120 mm,相对回淤坡度为 25.8%。将回淤长度 (Lu)、相对回淤坡度 (φ)与堆积区坡度 (θ_a)的关系拟合如下

$$Lu = -28.36 \theta_a + 218.08 \quad R^2 = 0.9575$$

$$\varphi = 2.05 \theta_a + 18.89 \quad R^2 = 0.9809$$

2.2.4 流通区坡度与沟口回淤关系

以表 1中 D组的三种流通区坡度条件下共 24次连续堆积及 H组 4种流通区坡度条件下的单次堆积实验来分析流通区坡度对沟口回淤的影响(图 11和图 12)。

从图 10a和图 11a可知,不同流通区条件下泥

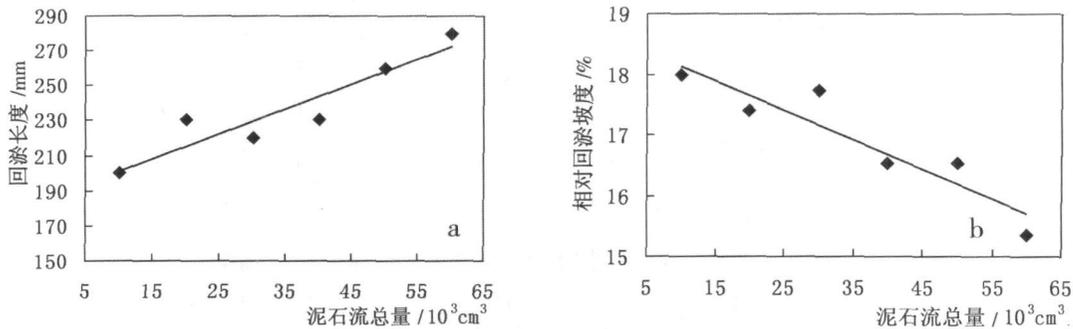


图 8 不同泥石流总量条件下回淤长度、相对回淤坡度对比

Fig. 8 The comparison of siltation length and relative back siltation slope in different debris flow volumes

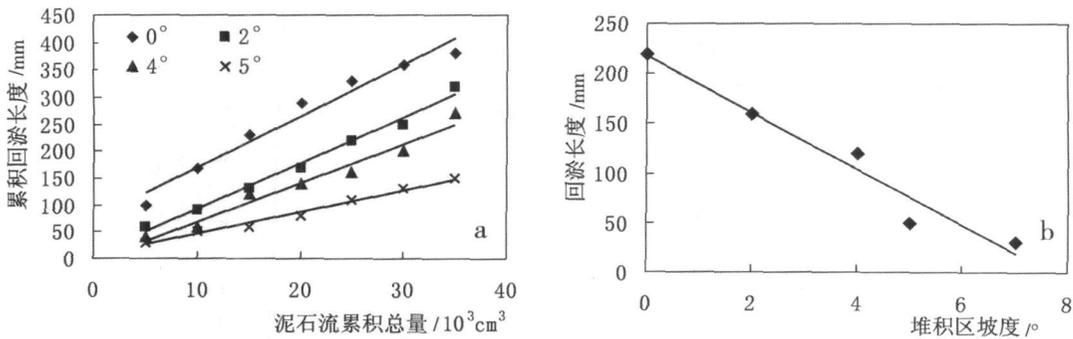


图 9 不同堆积区坡度条件下泥石流回淤长度对比 (a. 连续堆积;b. 单次堆积)

Fig. 9 The comparison of back siltation length in different slopes of deposition area

(a. continuous deposition; b. single deposition)

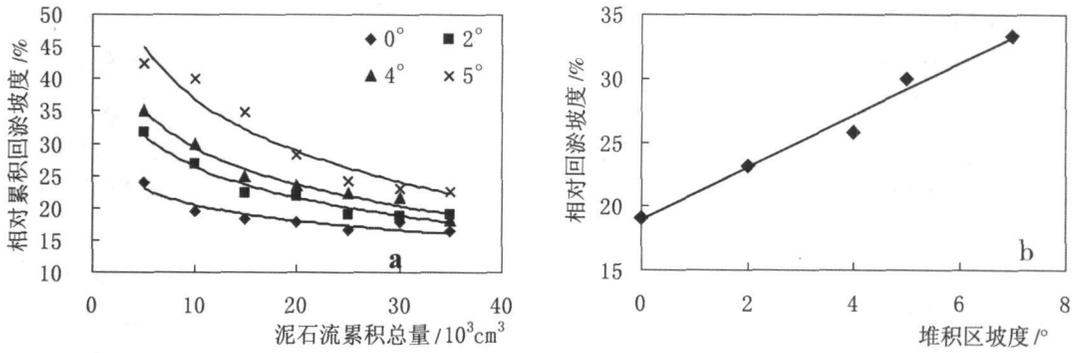


图 10 不同堆积区坡度条件下相对回淤坡度对比 (a. 连续堆积; b. 单次堆积)
 Fig. 10 The comparison of relative back siltation slope in different slopes of deposition area
 (a. continuous deposition; b. single deposition)

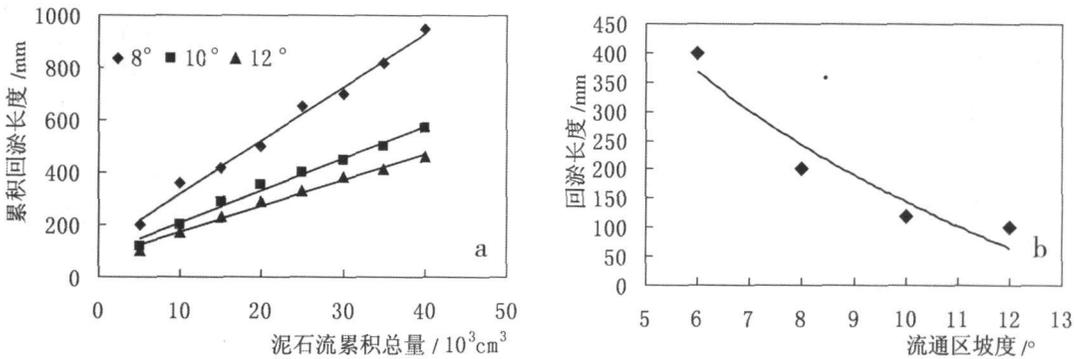


图 11 不同流通区坡度条件下泥石流回淤长度对比 (a. 连续堆积; b. 单次堆积)
 Fig. 11 The comparison of back siltation length in different channel slopes
 (a. continuous deposition; b. single deposition)

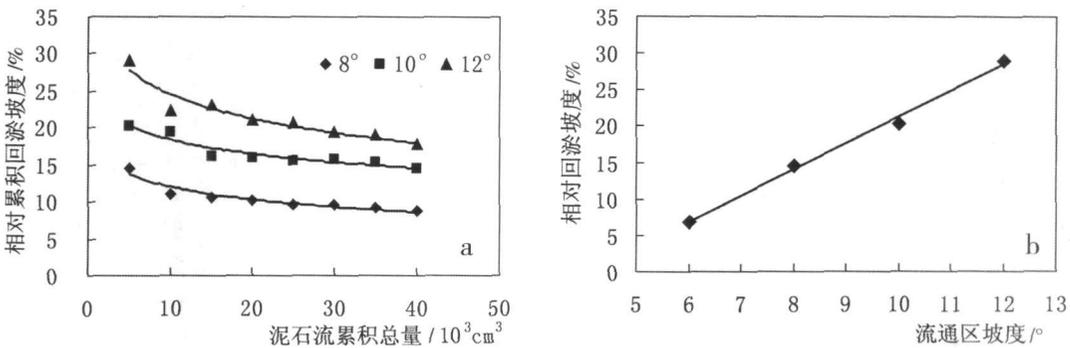


图 12 不同流通区坡度条件下相对回淤坡度对比 (a. 连续堆积; b. 单次堆积)
 Fig. 12 The comparison of relative back siltation slope in different channel slopes
 (a. continuous deposition; b. single deposition)

泥石流沟口回淤的发展同样符合上述规律。结果表明,在泥石流总量相同的情况下,流通区坡度越大,其沟口回淤长度随之呈对数减小,相对回淤坡度随之呈线性增大(图 11b和图 12b)。如当流通区坡度为 8°时,其沟口回淤长度为 200 mm,相对回淤坡度为 14.5%;流通区坡度为 12°时,其沟口回淤长度为 100 mm,相对回淤坡度为 29.0%。将回淤长度

(Lu)、相对回淤坡度 (φ)与流通区坡度 (θ_u)的关系拟合如下

$$Lu = -439.12 \ln(\theta_u) + 1155.5 \quad R^2 = 0.9175$$

$$\varphi = 3.62\theta_u - 14.92 \quad R^2 = 0.9945$$

2.3 粘性泥石流沟口回淤预测

根据上述对粘性泥石流沟口回淤发展过程及其影响因素的分析,应用表 1 中 4 组共 107 次粘性泥

泥石流连续堆积和 4 组共 21 次单次堆积实验的数据, 采用多元线性回归的方法, 得到粘性泥石流在连续堆积及单次堆积情况下沟口回淤的经验预测结果。对于连续堆积情况下, 沟口回淤的累积回淤长度 (L_{u_a}) 及相对累积回淤坡度 (φ_a) 的经验预测公式如下

$$L_{u_a} = -1190.41 + 186.49 \ln V_a + 19.76 r_m - 30.97 \theta_d - 61.07 \theta_u \quad R^2 = 0.84$$

$$\varphi_a = 95.46 - 6.24 \ln V_a - 2.01 r_m + 1.33 \theta_d + 2.06 \theta_u \quad R^2 = 0.81$$

上述针对粘性泥石流连续堆积情况下沟口预测的经验公式适用范围为: 每次泥石流冲出总量为约 5 000 m^3 , 重度为 17.6~19.6 kN/m^3 , 堆积区坡度为 $0^\circ \sim 5^\circ$, 流通区坡度为 $8^\circ \sim 12^\circ$ 。

对于单次堆积情况下, 沟口回淤的回淤长度 (L_u) 及相对回淤坡度 (φ) 的经验预测公式如下

$$L_u = -1798.13 + 97.35 \ln V + 79.19 r_m - 28.47 \theta_d - 40.43 \theta_u \quad R^2 = 0.85$$

$$\varphi = 165.89 - 5.87 \ln V - 6.23 r_m + 2.72 \theta_d + 2.42 \theta_u \quad R^2 = 0.79$$

上述针对粘性泥石流单次堆积情况下沟口预测的经验公式适用范围为: 重度为 17.6~21.6 kN/m^3 , 堆积区坡度为 $0^\circ \sim 7^\circ$, 流通区坡度为 $6^\circ \sim 12^\circ$ 。

4 结论

1. 泥石流沟口回淤的发展过程可概括为三个阶段。第一阶段, 随泥石流冲出量的增大, 沟口回淤长度随之而增大, 相对回淤坡度随之而减小; 第二阶段, 沟口回淤长度继续增大, 相对回淤坡度继续减小, 但减小的幅度降低; 第三阶段, 沟口回淤坡度进入一个较为稳定的阶段。整个发展过程中, 回淤长度与泥石流总量呈线性正相关关系, 相对回淤坡度与泥石流总量呈对数负相关关系。

2. 在泥石流总量相同的情况下, 沟口回淤长度随泥石流重度增大而呈线性增大, 随堆积区坡度增大而呈线性减小, 随流通区坡度增大而成对数减小。相对回淤坡度随泥石流重度的增大呈线性减小, 随堆积区坡度增大而呈线性增大, 随流通区坡度增大而呈线性增大; 在泥石流总量不同的情况下, 随泥石流总量的增大, 其沟口回淤长度随之呈线性增大, 而相对回淤坡度随之呈线性减小。

3. 沟口回淤的发展过程虽然可初步概括为三个阶段, 但是之后如何发展, 是否继续保持稳定的回淤坡度尚未可知; 影响沟口回淤的因素除泥石流总量、重度、堆积区坡度、流通区坡度, 还有泥石流体的颗粒级配、沟口地形等因素。因此, 今后将继续开展一系列实验来探讨这些问题。此外, 通过实验建立的沟口回淤长度和相对回淤坡度的经验预测公式, 需要根据野外实测的数据进行验证。

参考文献 (References)

- [1] Kang Zhicheng Li Zhuofen Luo Jintian Debris flow researches in China [M]. Beijing Science Press 2004: 5-6 [康志成, 李焯芬, 罗锦添. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 5-6]
- [2] Tang Bangxing Zhou Bifan Wu Jishan et al Debris flow in China [M]. Beijing China Commerce and Trade Press 2000: 15-16 [唐邦兴, 周必凡, 吴积善, 等. 中国泥石流 [M]. 北京: 商务出版社, 2000: 15-16]
- [3] Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Academia Sinica and Traffic Science Institute of Gansu Province China Debris flow in Gansu Province [M]. Beijing the Publishing House of People's Transportation 1982: 133-134 [中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 133-134]
- [4] Wu Jishan Kang Zhicheng Tian Lianquan Debris flow observation study in Jiangjia Gully Yunnan Province [M]. Beijing Science Press 1990: 176-177 [吴积善, 康志成, 田连权. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 176-177]
- [5] Kang Zhicheng Zhang Shucheng Du Ronghuang The formation conditions and development tendency of debris flow in Daqiao River Dongchuan District Yunnan Province [G] // Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research CAS Debris Symposium (1). Chongqing Scientific and Technological Literature Press 1981: 10-25 [康志成, 章书成, 杜榕桓. 云南东川大桥河泥石流形成条件及发展趋势的分析 [G] // 中国科学院地理研究所. 泥石流论文集 (1). 重庆: 科学技术文献出版社, 1981: 10-25]
- [6] He Yiping Influence of debris flow on river channel change of Mountains [D]. Chengdu Ph. D Dissertation of Institute of Mountain Hazards and Environment CAS 2003: 14 [何易平. 泥石流对山区河流河床演变的影响 [D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2003: 14]
- [7] Chen Fei Geologic hazard and its control in Yangtze valley [M]. Wuhan Changjiang Press 2007: 232-233 [陈飞. 长江流域地质灾害及防治 [M]. 武汉: 长江出版社, 2007: 232-233]
- [8] North-East China Municipal Engineering Design Institute Design standard of urban flood control engineering (CJJ 50-92) [S]. Beijing The standard of the People's Republic of China 1993: 27-28 [中国市政工程东北设计院. 城市防洪工程设计规范 (CJJ 50-92) [S]. 北京: 中华人民共和国行业标准, 1993: 27-28]

Experimental Study on Back Siltation in the Outlet of Viscous Debris Flow Channel

LIU Jinfeng^{1, 2}, YOU Yong^{1, 2}

(¹ Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

² Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract: Back siltation is usually formed in the outlet of viscous debris flow channel and causes damages. To discuss the development process, the influence factors and prediction of the back siltation in viscous debris flow gullies, 107 continuous experiments in four groups and 21 single experiments in four groups are carried out in different debris flow volumes, densities, slopes of deposition area and channel conditions. The results indicate that the accumulative back siltation length has a linear positive relation with the debris flow volume, and the relative accumulative back siltation slope has a logarithmic negative relation with the debris flow volume. Based on the change of the relative accumulative back siltation slope, the development of the back siltation in viscous debris flow gullies are divided into three stages. Under the same debris flow volume condition, the back siltation length increases linearly with the increase of debris flow density, decreases linearly with the increase of slope of deposition area and decreases logarithmically with the increase of channel slope; the relative back siltation slope decreases linearly with the increase of debris flow density, increases linearly with the increase of slope of deposition area and increases linearly with the increase of channel slope. Under different debris flow volume condition, the back siltation length increases linearly and the relative back siltation slope decreases linearly with the increase of debris flow volume. Based on the analysis of back siltation development process and the influential factors, applied the multiple linear regression method, the empirical formulas in continuous and single deposition conditions are established to predict the back siltation in viscous debris flow gullies.

Key words: viscous debris flow; back siltation; experimental study; back siltation length; relative back siltation slope