

基于分形理论和模型试验的沟道物源动储量评价模型

张友谊, 王云骏, 袁亚东

Dynamic reserves of evaluation model for materials source in the channel based on fractal theory and model test

ZHANG Youyi, WANG Yunjun, and YUAN Yadong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1-9

基于遗传规划的泥石流多因子融合预测方法

Multi-factors fusion method of debris flow prediction based on genetic programming

翟淑花, 冒建, 南, 刘欢欢, 王云涛, 王强强, 熊春华, 王艳梅 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 111-115

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

兰州地区黄土水平冻胀力分析

Experimental analysis of horizontal frost heaving force of loess in Lanzhou City of Gansu Province Area

张正, 马学宁, 朱启有 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 102-107

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202006

张友谊, 王云骏, 袁亚东. 基于分形理论和模型试验的沟道物源动储量评价模型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 40-49.
ZHANG Youyi, WANG Yunjun, YUAN Yadong. Dynamic reserves of evaluation model for materials source in the channel based on fractal theory and model test[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 40-49.

基于分形理论和模型试验的沟道物源动储量评价模型

张友谊¹, 王云骏¹, 袁亚东²

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;
2. 四川正天创意设计有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:汶川地震后, 大量松散固体物源堆积在沟道中, 使沟道泥石流发生的概率激增。准确的计算泥石流沟道物源的动储量一直是泥石流物源统计的难点。文章以七盘沟下游主沟段沟道物源为研究对象, 在实地勘察、资料收集的基础上, 以室内模型试验为研究手段, 引入分形理论将复杂的土体粒度成分用分维值定量描述, 研究不同沟道堆积体在不同降雨作用下的侵蚀规律, 建立以降雨强度和分维度为双影响因子的动储量评价模型。研究表明: 粗粒土不易起动, 但在充足的水动力条件下, 侵蚀作用会成倍放大; 上细下粗土发生泥石流时侵蚀变化和总的侵蚀规模较小, 这种粒序分布形式有益于沟道的稳定; 上粗下细土与粗粒土的侵蚀现象类似, 但发生大规模泥石流的降雨阈值低于粗粒土; 沟道物源中, 侵蚀作用效应的排序为: 溯源侵蚀>下切侵蚀>侧缘侵蚀>潜蚀; 文章所拟合的公式适用于宽缓型沟道泥石流, 对于窄陡型沟道泥石流存在一定的局限性。

关键词: 泥石流; 沟道物源; 动储量; 模型试验; 分形理论

中图分类号: P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)05-0040-10

Dynamic reserves of evaluation model for materials source in the channel based on fractal theory and model test

ZHANG Youyi¹, WANG Yunjun¹, YUAN Yadong²

(1. Southwest University of Science and Technology Civil Engineering and Architecture, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. ZT-ARCH Design, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: After the Wenchuan earthquake, many loose solid sources accumulated in the channel, which increased the probability of debris flow. It was difficult to calculate the dynamic reserves of debris flow sediment source accurately. Based on field investigation, data collection and laboratory model test, this paper introduced the fractal theory to quantitatively describe the complex soil particle size composition with fractal dimension, and studied the erosion regular of different deposits in channels under different rainfall effects. A dynamic reserve evaluation model with rainfall intensity and fractal dimension as double influencing factors was established. The results show: Coarse-grained soil is not easy to start, but under sufficient hydrodynamic conditions, erosion will be multiplied; When debris flow occurs, the erosion change and total erosion scale of "fine-grained on coarse-grained soil" are small, and which is beneficial to the stability of channel; The erosion phenomenon of "coarse-grained on fine-grained soil" is similar to that of coarse-grained soil, but the rainfall threshold of large-scale debris flow

收稿日期: 2022-02-09; 修订日期: 2022-05-30

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505400); 国家自然科学基金面上项目(41877524)

第一作者: 张友谊(1980-), 男, 安徽宿州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为地质灾害成因机理及防治技术。E-mail: 53437391@qq.com

is lower than coarse-grained soil; For materials source in the channel, the order of erosion effect is headward erosion > shear erosion > lateral erosion > subsurface erosion; The formula fitted in this paper is suitable for the wide and slow channel of debris flow, but it has some limitations for the narrow and steep channel.

Keywords: debris flow; the materials source in channel; dynamic reserves; model test; fractal theory

0 引言

2008年汶川地震以来,各类物源参与泥石流活动的贡献度随着时间的推移而改变,崩滑物源的供给不断衰减,预计将在2025年达到震前水平^[1]。但由于沟道中仍有足够的物源储量,泥石流活动将持续更长的时间——沟道物源逐渐成为震后泥石流暴发的主要物源之一^[2]。

传统的泥石流物源统计方法是根据实地调查来估算河道网络中储存的物源量^[3]。近年来,通过数学统计方法,有学者^[2,4]选取震区多条泥石流的物源及各类物源样本数据建立回归模型,得到总的物源量与动储量具有线性关系。面对极端降雨情况,台湾地区的学者^[5]从地貌参数、地质指标和降雨因素出发,构建多元回归模型,以此估算泥石流流域的总物源量。针对沟道物源,亦有学者^[6-7]通过人工降雨模型试验来研究其起动模式,并以降雨强度为主要影响因子预测其一次冲出量。

在实际的工程中,工程设计所需的泥石流流动储量仍采用定性分析、比例统计、形态判别、稳定分析等统计方法。这些方法没有统一的标准衡量,往往不同的方法计算结果差异较大。目前,对泥石流流动储量的研究主要是从地形地貌等方面出发,室内物模型试验方法的研究相对缺乏。

沟道内的松散物质是流域侵蚀演化的产物^[8-9],其动储量不仅与地形地貌和降雨因素有关,粒径组成亦是影响其起动量大小的关键因素之一,但土体复杂的粒度组成导致其缺乏相适的定量参数来进行分析,而分形理论为此提供了新的理论方法^[10]。

因此,通过室内物理模型试验,研究沟道内不同分维的堆积体在各频率降雨条件下的侵蚀规律,构建雨强和分维值为双影响因素的动储量评价模型,可为震后泥石流治理工程计算沟道动储量提供新思路。

1 分形理论及分维值

近年来,有国内学者提出应加强针对固体物质岩土特性随时间的动态演变规律的研究^[11]。因此,利用分形理论中具有自相似性的线性分形,局部按照整体成比例缩小来定量描述沟道物源的粒度演化,这种自相似性的

参数即是分维值。

在土体工程分类实例计算中^[12],分维值作为一个综合定量指标的特征参数,可反映各种粒径大小在土体中的组成特点。

土体工程分类中,设土的粒径为 z , $N(z)$ 为大于粒径 z 的数量,有:

$$N(\geq z) = \int_z^{\infty} P(z') dz' \propto z^{-D} \quad (1)$$

式中: D ——分维;

z' ——粒径自变量;

$P(z')$ ——粒径 z 的分布密度函数。

粒径组成的分维亦可用对应的质量关系来讨论,设 $m(z)$ 为小于粒径 z 的质量, M 为样本土体的总质量,有:

$$\frac{m(z)}{M} \propto z^a \quad (2)$$

则:

$$dM \propto z^{a-1} dz$$

对式(1)求导得:

$$dN \propto z^{-D-1} dz$$

由于粒径的增加与质量的增加是相对应的,则有:

$$dM \propto z^3 dN$$

也即:

$$z^{a-1} dz \propto z^3 \cdot z^{-D-1} dz$$

即分维值:

$$D = 3 - a \quad (3)$$

2 试验方案

2.1 模型相似比

泥石流室内模型试验的动力特征、几何形态以及边界条件等相似条件都与泥石流的物质组成、流变特性息息相关,根据其运动特性,主要引用以下相似理论。

(1)相似比例

将七盘沟主沟下游作为试验模型原型,结合试验场地条件和经济性,确定缩尺比例为:

$$C_m = \frac{\text{模型尺寸}}{\text{原型尺寸}} = \frac{1}{100} \quad (4)$$

(2)初始条件

人工逐层夯实堆土并静置 1d,使其初步固结,并达到野外现场采样所测 5% 含水率,以确保试验土体与野外相符。

(3)降雨条件

由相似原理的第二定理推导得到降雨时长和降雨量的缩尺比例为:

$$\frac{t}{t_m} = \sqrt{C_m} \quad (5)$$

$$\frac{q}{q_m} = \sqrt{C_m} \quad (6)$$

2.2 试验模型几何参数

研究段沟道平均坡降为 176 ‰,将堆积体坡度定为 10°,按照相似比,试验模型宽度为 1 m,土体堆积长度为 2.3 m。将堆积体分为前缘、中部、后缘三部分以便对其侵蚀规律分析。按照泥石流排导最佳矩形断面尺寸为土体厚度与断面宽度比为 1 : 4 ~ 1 : 2^[13],试验选取土体厚度为 0.3 m。对于双层堆积体,一般表层较薄,因此将土层分为 0.1 m 的表层和 0.2 m 的底层,如图 1 所示。

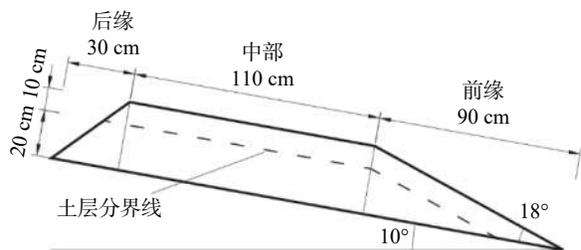


图 1 堆积体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deposit

2.3 试验影响因子

(1)降雨

降雨强度按照《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》求得研究区各雨频下的小时降雨量。再结合铁道部第二勘测设计院的《铁路小桥涵设计》中关于西南地区小流域暴雨计算公式求得径流流量,并按模型相似比对径流流量进行 1 : 10⁶ 折减,得到相应试验径流量,降雨用时按式(5)折减^[14],最终得表 1。

表 1 模型试验降雨条件

Table 1 Rainfall conditions of the model test

雨频/%	雨强/(mm·h ⁻¹)	前期降雨用时/s	径流/(L·h ⁻¹)
10	33.2	359	406.8
5	38.1	341	511.4
2	44.4	320	648.2
1	49.1	306	752.4

(2)粒径组成及堆叠

汶川地震后七盘沟多次爆发泥石流,其中 2013 年“7·10”和 2019 年“8·20”两次规模较大,经资料收集及现场筛分试验(图 2),得到“7·10”(表 2)及“8·20”(表 3)泥石流后沟道物源颗粒累积百分含量。



图 2 七盘沟沟道物源野外筛分试验

Fig. 2 Field screening test of materials source in Qipan gully

表 2 “7·10”后沟道物源颗粒累积百分含量

Table 2 Cumulative percentage of particles in the channel after “7·10”

编号	颗粒累积/%							
	200	60	20	5	2	0.5	0.25	0.075
ZG1	100	21.7	7.2	1.3	1.0	0.9	0.4	0.2
ZG2	100	16.9	5.9	1.4	1.7	1.4	0.5	0.2
ZG3	100	22.9	6.9	1.4	0.9	0.8	0.4	0.10
平均	100	20.8	7.0	1.7	1.2	1.1	0.4	0.2

表 3 “8·20”后沟道物源颗粒累积百分含量

Table 3 Cumulative percentage of particles in the channel after “8·20”

编号	颗粒累积/%							
	200	60	20	5	2	0.5	0.25	0.075
ZG1	100	81.3	43.7	32.9	22.6	9.5	5.2	1.1
ZG2	100	79.9	53.0	40.6	33.3	17.0	7.3	4.1
ZG3	100	86.7	50.9	39.3	26.7	17.8	11.2	3.9
平均	100	82.6	49.2	37.6	27.5	14.8	7.9	3.0

试验土体使用以上两种土体为原型土,按其分维大小相应分为粗粒土和细粒土。鉴于试验水槽及仪器设备的尺寸限制,试验土体粒径最大界限为 20 mm^[15],再按土工试验等量替代法处理得到试验土级配曲线(图 3—4)。

由于当前沟道物源呈明显的分层堆叠形式,试验中堆积体按粗粒土、细粒土、上细下粗型及上粗下细型四种组成形式考虑。通过分维理论对堆积体粒度成分特

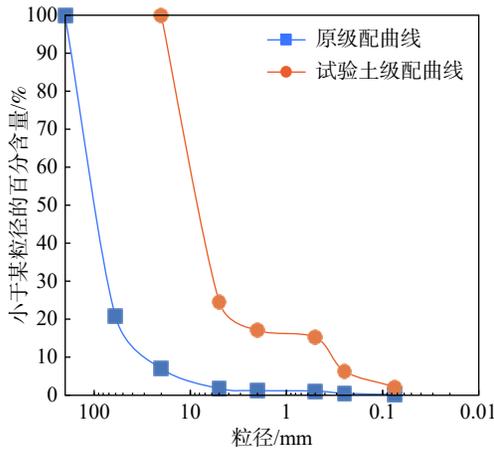


图3 “7·10”试验土级配曲线

Fig. 3 “7·10” test soil grading curve

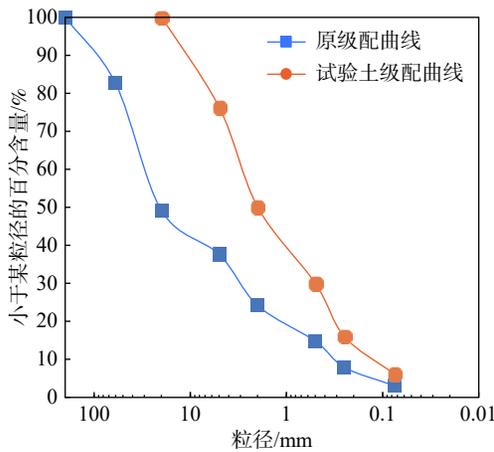


图4 “8·20”试验土级配曲线

Fig. 4 “8·20” test soil grading curve

征进行指标界限值的分类, 得表4。

表4 试验土分维值
Table 4 Fractal dimension of test soil

试验堆积体	分维值D	范围	类型
“7·10”粗粒土	2.250	<2.60	块碎石土
“8·20”细粒土	2.639	2.60 ≤ D < 2.82	碎石土
双层上细下粗	2.522	<2.60	块碎石土
双层上粗下细	2.596	<2.60	块碎石土

注: 其中分维D越小, 粒度越粗, 分维D越大, 粒度越细。

2.4 试验设计

试验设计为两因素四水平单因素对照试验, 试验装置包括高速摄影系统(型号为日本产 MEMRECAMHX-4 高速摄像机)、人工降雨系统(流量表、喷头、水管和支架等部分组成, 流量表型号: SJLWGYB10L)、模型槽系统(长 3 m, 宽 1 m, 深 1 m, 两侧采用钢化玻璃制作, 骨架采用钢材焊接而成, 并在玻璃用有色胶带纵向划分

堆积体的分层界限, 横向划分堆积体的范围)等 3 部分组成, 而沟槽系统包括地表径流系统和冲出物收集箱, 如图 5 所示。共进行 16 次试验, 具体方案见表 5。

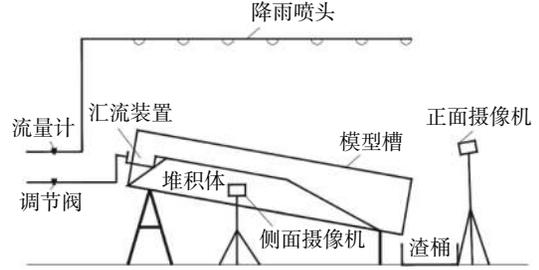


图5 试验布置
Fig. 5 Test layout

表5 单因素对照试验设计方案

Table 5 Single factor-controlled trial design scheme

编号	堆积体分维D	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	编号	堆积体分维D	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
1-1	2.639	33.2	3-1	2.522	33.2
1-2		38.1	3-2		38.1
1-3		44.4	3-3		44.4
1-4		49.1	3-4		49.1
2-1	2.250	33.2	4-1	2.596	33.2
2-2		38.1	4-2		38.1
2-3		44.4	4-3		44.4
2-4		49.1	4-4		49.1

3 侵蚀分析

径流形成之前, 前期降雨使堆积体土体趋近于饱和, 黏聚力与内摩擦角的减小使得土体抗剪强度减弱, 为沟道物源的的起动提供了条件。

降雨越大, 沟道径流的流量、流深以及速度等参数越大, 相应的流体的侵蚀能力、侵蚀范围以及挟沙能力均呈正相关变化^[16-18], 而堆积体组成粒径大小及组成也不同程度地影响着侵蚀能力。

3.1 单层堆积体

(1) 细粒土

由于颗粒粒径较小易起动, 雨强较小时(33.2~38.1 mm/h)前缘陡坡段因流速增大发生下切, 随后演变成溯源侵蚀; 雨强较大时(44.4~49.1 mm/h)中部缓坡形成多条径流展开侵蚀, 并逐渐汇聚, 前缘陡坡段以下切侵蚀为主, 随着水力梯度不断增大, 逐渐发生溯源侵蚀, 形成下切→陡坎→溯源的循环侵蚀模式(图6)。

侵蚀深度受该模式的影响其峰值出现在距后缘 0.5 m 的缓坡段, 深度约为 0.25 m。边坡随着侧缘侵蚀(以及掏蚀)的加剧, 坡脚失稳垮塌, 大量物源并入泥石流的发生, 侵蚀宽度增大并在一定范围内波动(图7)。



图 6 细粒土 49.1 mm/h 试验过程现象

Fig. 6 Test process phenomenon in 49.1 mm/h (fine-grained soil)

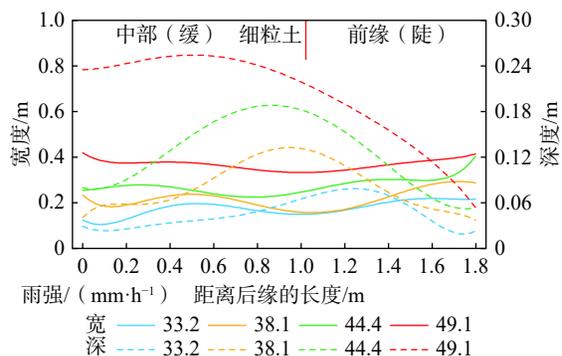


图 7 细粒土侵蚀宽度与深度

Fig. 7 Erosion of width and depth (fine-grained soil)

(2)粗粒土

粗粒土由于内摩擦角较大难以启动,但由于渗透系数较大,来流加速渗流作用并发生潜蚀现象,内部细小颗粒的迁移导致堆积体中部沉降,水流汇聚。而前缘陡坡段水力梯度较大,随着渗流作用的加剧,孔隙水压力增大,前缘发生牵引式破坏(图 8)。

雨强较大时(44.4~49.1 mm/h)这种滑塌使得溯源侵蚀显著且剧烈,物源起动的规模成倍放大;但较小的雨强(33.2~38.1 mm/h)只能使前缘陡坡粗粒土滑动堆积或者发生有限的溯源侵蚀,难以发生大规模侵蚀(图 9)。

(3)单位侵蚀量变化

由图 10 和图 11 可知,粗粒土雨强较小时不易发生侵蚀或侵蚀规模较小,而在极端降雨下(49.1 mm/h)一



图 8 粗粒土 49.1 mm/h 试验过程现象

Fig. 8 Test process phenomenon in 49.1 mm/h (coarse-grained soil)

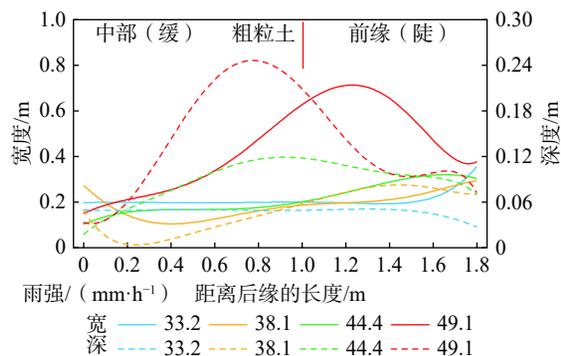


图 9 粗粒土侵蚀宽度与深度

Fig. 9 Erosion of width and depth (coarse-grained soil)

旦有充足的水动力条件使其启动,由于粒径大,黏粒少,土体骨架结构一旦被破坏,侵蚀效应成倍放大,发生泥石流的规模增大。

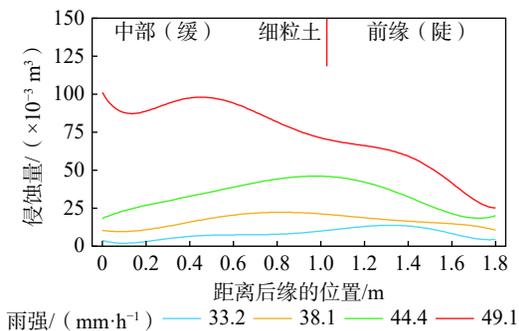


图 10 细粒土单位侵蚀量

Fig. 10 Erosion amount per unit (fine-grained soil)

3.2 多层堆积体

(1)上细下粗土

在地形坡度突增,表层细粒土在该位置率先启动,溯源侵蚀逐渐向后缘发展,而前缘陡坡因流速增大,粗粒土受下切作用不断被挟带滚落。

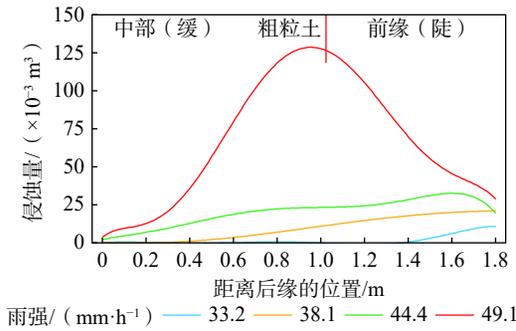


图 11 粗粒土单位侵蚀量

Fig. 11 Erosion amount per unit (coarse-grained soil)

在中部缓坡段, 由于底层颗粒较粗且受表层土体自重应力影响, 不易向两侧发生侧缘侵蚀, 主要是表现为下切侵蚀和溯源侵蚀, 边坡两侧出现张拉裂缝(图 12)。

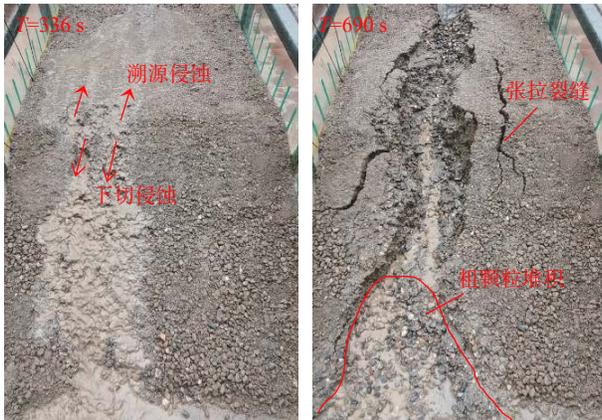


图 12 上细下粗土 49.1 mm/h 试验过程现象

Fig. 12 Test process phenomenon in 49.1 mm/h (fine-grained on coarse-grained soil)

对于图 13 中各降雨条件下, 上细下粗土在前缘段侵蚀宽度的突增, 是由于颗粒分选效应导致大量粗颗粒在前缘形成堆积, 其较大的抗剪强度, 使得泥石流下深度有限, 为满足泥石流的泄流, 侧缘侵蚀加剧, 侵蚀宽度增大。

(2) 上粗下细土

随着径流到达前缘, 逐渐出现管涌现象, 细小颗粒的大量流失使土体颗粒骨架结构被破坏, 堆积体从前缘开始发生塌陷。

塌陷后粗颗粒发生沉降, 管涌现象向四周扩散, 堆积体不断滑塌加入泥石流活动, 溯源侵蚀急剧且强烈, 发生大规模的物源起动(图 14)。

在该堆叠模式中, 亦会出现颗粒分选效应使前缘粗颗粒堆积导致的侵蚀宽度突增这一现象。除此之外, 一旦强降雨(44.4~49.1 mm/h)使得该次泥石流的侵蚀深

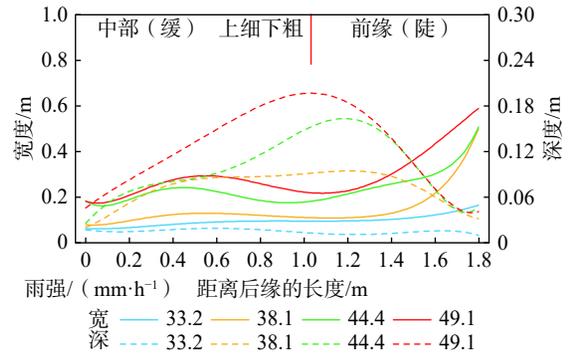


图 13 上细下粗土侵蚀宽度与深度

Fig. 13 Erosion of width and depth (fine-grained on coarse-grained soil)

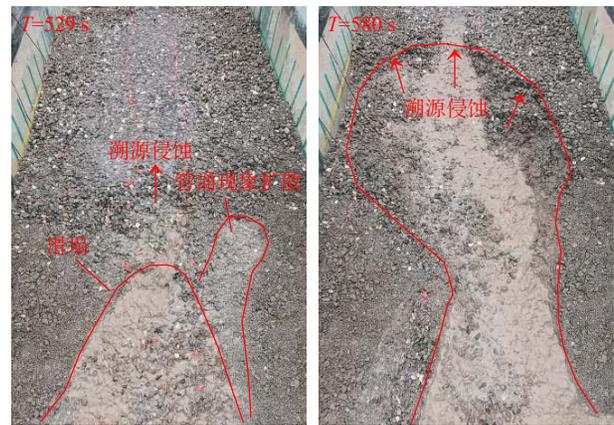


图 14 上粗下细土 49.1 mm/h 试验过程现象

Fig. 14 Test process phenomenon in 49.1 mm/h (coarse-grained on fine-grained soil)

度超过土体分层界限(0.1 m), 其发生的侵蚀规模将显著增加, 如图 15 所示。

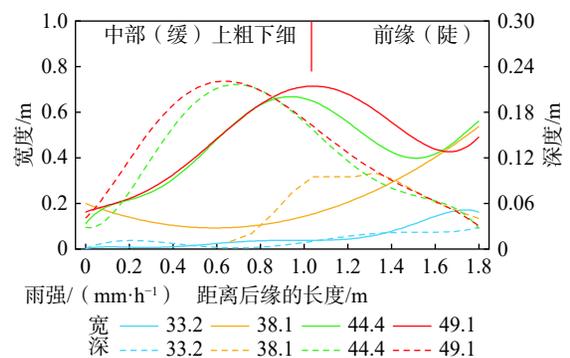


图 15 上粗下细土侵蚀宽度与深度

Fig. 15 Erosion of width and depth (coarse-grained on fine-grained soil)

(3) 单位侵蚀量变化

图 16 所示上细下粗的多层堆叠土在四个类别的堆积体中, 其侵蚀规模和变化幅度也最小的。即使是百年

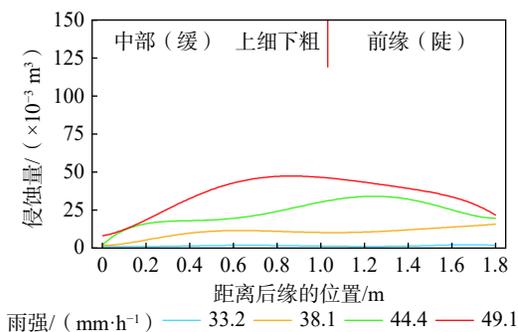


图 16 上细下粗土单位侵蚀量
Fig. 16 Erosion amount of per unit (fine-grained on coarse-grained soil)

一遇的降雨条件(49.1 mm/h),其单位侵蚀量最大值也不足 $50 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,这种堆叠模式有益于沟道堆积体的稳定。

图 17 所示上粗下细土的多层堆叠土与图 11 所示粗粒土类似,在雨强较小时,侵蚀作用相对较弱,仅在前缘陡坡段发生较小规模的侵蚀,但强降雨作用下(44.4~49.1 mm/h),上层粗粒土对下层细粒土的铲刮以及细粒土土体失稳造成的溯源侵蚀扩大使得侵蚀规模增大。这种堆叠模式与粗粒土侵蚀现象相似的同时,大规模泥石流发生的降雨阈值下降。

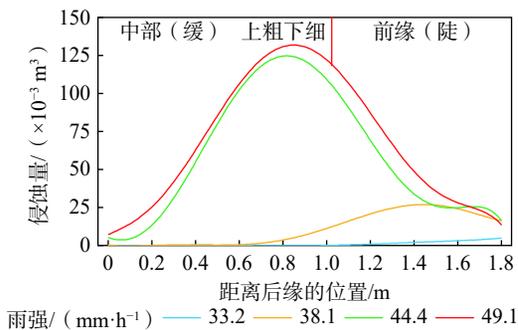


图 17 上粗下细土单位侵蚀量
Fig. 17 Erosion amount of per unit (coarse-grained on fine-grained soil)

可见,除了降雨因素外,颗粒分选效应及粒序分布形式对沟道物源的起动有着显著影响。由试验分析可知,对沟道侵蚀作用的效应排序为:溯源侵蚀>下切侵蚀>侧缘侵蚀>潜蚀。溯源侵蚀是沟道物源起动加入泥石流的重要侵蚀过程。

将试验单次泥石流过后堆积体每隔 0.1 m 所测的侵蚀宽度及深度按照式 (7) 求和得到总的侵蚀量(表 6)。

$$V_{\text{侵}} = \sum_1^i 0.1b_i \cdot h_i, (i \in [1, 20]) \quad (7)$$

式中: $V_{\text{侵}}$ ——总侵蚀量/ m^3 ;
 b ——侵蚀宽度/m;
 h ——侵蚀深度/m。

测量计算数据汇总得表 6。

表 6 沟道侵蚀数据统计
Table 6 Data statistics of the channel erosion

D	$q/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$V_{\text{侵}}/\text{m}^3$	D	$q/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$V_{\text{侵}}/\text{m}^3$
2.639	33.2	0.015 90	2.522	33.2	0.003 11
	38.1	0.033 10		38.1	0.020 63
	44.4	0.066 21		44.4	0.045 94
	49.1	0.145 78		49.1	0.062 91
2.250	33.2	0.002 95	2.596	33.2	0.001 90
	38.1	0.019 07		38.1	0.020 91
	44.4	0.039 63		44.4	0.116 03
	49.1	0.131 33		49.1	0.132 82

4 动储量评价模型

采用 Origin Pro 2018 对表 6 的数据进行拟合,得到四种不同分维值的堆积体以雨强为影响因子的侵蚀量曲线如图 18 所示。

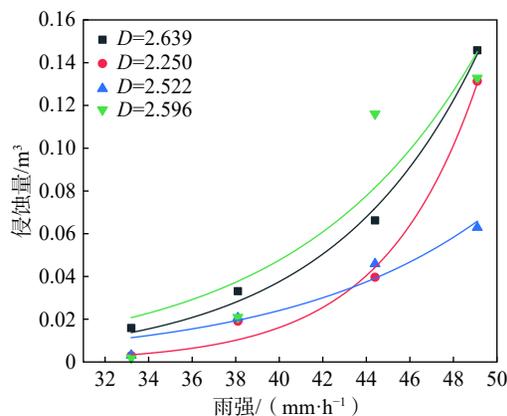


图 18 试验模型侵蚀量与雨强的曲线关系
Fig. 18 Curve relationship between erosion amount and rainfall intensity in the test model

将上述四种模型分别无量纲化处理,通过 SPSS 软件数据处理得到关于降雨强度和分维值的双变量拟合公式,并模型试验缩尺比例对应放大得到($R^2=0.84$):

$$V_{\text{拟}} = 2.289 \times 10^{-2} \times L \times D \times 1.152^Q \quad (8)$$

式中: $V_{\text{拟}}$ ——侵蚀量/ m^3 ;
 L ——流通堆积区沟道长度/km;
 D ——分维值;
 Q ——降雨系数, $Q = q/q_0$;
 q ——降雨强度/ $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$;
 q_0 ——单位降雨强度/ $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$ 。

上述公式不仅考虑了不同的设计雨强, 亦考虑了堆积物的物质组成 结构影响, 更方便于工程应用。

5 验证

选取宽缓型沟道七盘沟—“7·10”和锄头沟—“8·20”泥石流流分别验证其动储量, 并以方群生的统计模型^[2]、实际调查统计得到的动储量与文章拟合的公式相互验证、分析讨论。

锄头沟主沟长约 8.9 km, 平均纵坡降约 184 ‰, 计算各雨频下的降雨强度得表 7, 并对流通堆积区进行现场颗分试验得表 8。

表 7 雨强计算

Table 7 Calculation of rain intensity

频率	暴雨均值 H/(mm·h ⁻¹)	变差系数 C _v	模比系数 K _p	暴雨设计值 H _p /(mm·h ⁻¹)
2%	22	0.35	1.92	42.2
5%			1.67	36.7
10%			1.47	32.3
20%			1.26	27.7

表 8 锄头沟“8·20”后沟道物源颗粒累积百分含量

Table 8 Cumulative percentage of particles in Chutougou after “8·20”

取样	颗粒累积/%							
	200	50	20	5	2	0.5	0.25	0.075
S ₁	100	40.1	32.8	28.3	21.7	12.6	9.2	1.4
S ₂	100	59.4	38.5	32.9	21.3	9.5	6.2	1.1
S ₃	100	65.2	46.4	41.4	31.7	16.6	11.7	2.1
平均	100	54.8	39.0	34.2	24.9	12.9	9.0	1.5

(1) 文章的拟合公式

根据上述条件, 由式(8)得到模型试验各降雨频率下的侵蚀量(表 9)。

由于实际泥石流过程中, 一次泥石流导致的物源起动力和最终冲出量并不能完全代表其动储量。因此对于上述式(8)的计算结果, 并不能直接代表沟道物源的动储量, 并且在实际工程应用中会考虑不同的设防标准来计算拦排固体物质总量, 常采用“5 年一遇 3 次+10 年一遇 2 次+20 年一遇 1 次”、“3 次 20 年一遇”或者按“50 年一遇”以此对文章拟合公式进行改进, 得到动储量计算公式:

$$V = \bar{V} = 7.63 \times 10^{-3} \times D \times C \times (\mu^{Q_{2\%}} + 4 \times \mu^{Q_{5\%}} + 2 \times \mu^{Q_{10\%}} + 3 \times \mu^{Q_{20\%}}) \quad (9)$$

式中: V——沟道动储量/10⁴ m³;

μ——常数, μ=1.152。

表 9 本文拟合计算结果

Table 9 The results of the fitting calculations in this paper

沟道	D	雨频	降雨强度 /(mm·h ⁻¹)	流通堆积区 /km	侵蚀量 /(10 ⁴ m ³)
锄头沟	2.572	20%	27.7	4.3	12.75
		10%	32.3		24.46
		5%	36.7		45.58
		2%	42.2		99.23
七盘沟	2.250	20%	28.0	3.9	10.56
		10%	33.2		22.03
		5%	38.1		44.09
		2%	44.4		107.49

计算得表 10 如下。

表 10 动储量计算

Table 10 Dynamic reserve calculation

沟道	设防标准	动储量/(10 ⁴ m ³)	均值/(10 ⁴ m ³)
锄头沟	V _{5%} +2V _{10%} +3V _{20%}	132.75	122.91
	3V _{5%}	136.74	
	V _{2%}	99.23	
七盘沟	V _{5%} +2V _{10%} +3V _{20%}	119.83	119.86
	3V _{5%}	132.27	
	V _{2%}	107.49	

该优化公式结合了现有的泥石流防治工程设计规范, 考虑了设防标准, 以便实际工程中运用定量计算沟道物源的动储量。

(2) 文献^[2]的统计模型

统计拟合出沟道物源动储量与总物源量的相关性公式, 即:

$$V_{O(g)} = 0.498 \times V_g^{0.781} \quad (10)$$

式中: V_{O(g)}——沟道物源动储量/10⁴ m³;

V_g——沟道总物源量/10⁴ m³。

汇总得到表 11。

文献^[2]其拟合结果与实际调查得到的动储量存在一定差异(误差>20%)。文章拟合公式从沟道堆积体的粒度成分和降雨条件出发, 得到与实际调查更加贴合的沟道物源动储量评价模型(误差<10%)。

文章拟合结果误差讨论: 与实际调查结果相比偏小, 但实际调查结果会由于调查人员的工作经验存在不同程度的测量误差。除此之外, 在试验本身上, 缩尺效应的影响难以避免, 并且文章的动储量计算公式是在尺寸固定的沟道模型上建立, 而在实际的沟道地形中, 其每段沟道的宽度和堆积体厚度都不是定值, 存在着固有的试验误差。对于-4.59~9.38%的误差值, 该公式在允

表 11 计算结果比较

Table 11 Comparison of calculation results

沟道	计算方法	动储量计算值/(10 ⁴ m ³)	误差
锄头沟	实际调查统计	128.82(“8·20”后)	-
	文献 ^[2] 公式	98.42	-23.60%
	文章公式	122.91	-4.59%
七盘沟	实际调查统计	132.26(“7·10”后)	-
	文献 ^[2] 公式	100.19	-24.25%
	文章公式	119.86	-9.38%

许范围之内,仍能满足于宽缓型沟道泥石流的动储量计算。

6 结论

文章以宽缓型沟道为研究对象,在实地勘查,资料收集的基础上以室内模型试验为研究手段,分析研究沟道物源侵蚀规律,并建立动储量评价模型。主要得到以下结论:

(1)粗粒土在充足的水动力条件下,侵蚀作用会成倍放大,发生大规模的泥石流;

(2)上细下粗土的堆积体发生泥石流时侵蚀变化和总的侵蚀规模较小,这种粒序分布形式有益于沟道物源的稳定;

(3)上粗下细土与粗粒土的侵蚀现象类似,其泥石流大规模发生的降雨阈值降低;

(4)沟道物源中,侵蚀作用效应的排序为:溯源侵蚀>下切侵蚀>侧缘侵蚀>潜蚀(管涌);

(5)文章所拟合的公式考虑了沟道堆积体的粒度成分和降雨条件两个因素,得到与实际调查较为贴合的沟道物源动储量(误差小于 10%)。文中建立的动储量计算公式适用于宽缓型沟道,对于窄陡型沟道的物源统计存在一定的局限性。

在之后的沟道物源统计研究当中,应根据现场实际调查并结合遥感无人机技术得到沟道的特定形态包括宽度与长度、弯道曲率等多个特征和泥石流新近堆积层厚度等资料,分段统计累加得到沟道总动储量,使其更加准确适用。

参考文献(References):

- [1] XIONG J, TANG C, CHEN M, et al. Long-term changes in the landslide sediment supply capacity for debris flow occurrence in Wenchuan County, China [J]. *CATENA*, 2021, 203: 105340.
- [2] 方群生,唐川,王毅,等.汶川极震区泥石流动储量与总物源量计算方法研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(6): 1008 - 1014. [FANG Qunsheng, TANG Chuan, WANG Yi, et

al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(6): 1008 - 1014. (in Chinese with English abstract)]

- [3] JAKOB M, BOVIS M, ODEN M. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(6): 755 - 766.
- [4] 乔建平,黄栋,杨宗估,等.汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(2): 1 - 6. [QIAO Jianping, HUANG Dong, YANG Zongji, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan earthquake region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(2): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [5] CHANG C W, LIN P S, TSAI C L. Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(1/2): 83 - 90.
- [6] NI H Y. Experimental study on initiation of gully-type debris flow based on artificial rainfall and channel runoff [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 6213 - 6227.
- [7] 林斌,张友谊,罗珂,等.沟道松散物质起动机模型试验及冲出量预测——四川省以北川青林沟为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 113 - 118. [LIN Bin, ZHANG Youyi, LUO Ke, et al. Model test of start-up of loose material in gully and runoff volume prediction: Case of Qinglin ditch in Sichuan Province [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(5): 113 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张静,田述军,侯鹏鹏.基于面积-高程和面积-坡度积分的泥石流物质供给能力分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 9 - 16. [ZHANG Jing, TIAN Shujun, HOU Pengli. The material supply ability analysis of debris flows based on areahypsometric integral and area-gradient integral [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 9 - 16. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张田田,杨为民,万飞鹏.浑河断裂带地质灾害发育特征及其成因机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 149 - 161. [ZHANG Tiantian, YANG Weimin, WAN Feipeng. Characteristics and formation mechanism of geohazards in Hunhe fault zone [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 149 - 161. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡卸文.无泥型软弱层带物理力学特性[M].成都:西南交通大学出版社,2002. [HU Xiewen. Physical and mechanical properties of mudless weak zone [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)]

- [11] 潘华利,安笑,邓其娟,等.泥石流松散固体物源研究进展与展望 [J] . 科学技术与工程, 2020, 20(24): 9733 - 9741. [PAN Huali, AN Xiao, DENG Qijuan, et al. Progress and prospects of research on debris flow solid source [J] . *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(24): 9733 - 9741. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 魏玉虎,胡卸文,齐光辉.分形理论在土体粒度成分特征评价中的应用 [J] . 安徽地质, 2006, 16(2): 120 - 122. [WEI Yuhu, HU Xiewen, QI Guanghui. Application of fractal theory to evaluation of features of grain size composition of soil mass [J] . *Geology of Anhui*, 2006, 16(2): 120 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 游勇,柳金峰,欧国强.泥石流常用排导槽水力条件的比较 [J] . 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2820 - 2825. [YOU Yong, LIU Jinfeng, OU Guoqiang. Comparison of hydraulic conditions among usual debris flow drainage canal [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup 1): 2820 - 2825. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李书钦,高建恩,邵辉,等.选沙对水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响 [J] . 水土保持学报, 2009, 23(3): 6 - 10. [LI Shuqin, GAO Jianen, SHAO Hui, et al. Effects of model material selection on the similarity of erosion processes in hydraulic erosion simulation experiment [J] . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 6 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郭朝旭,崔鹏.宽级配弱固结土体内细颗粒迁移规律研究评述 [J] . 山地学报, 2017, 35(2): 179 - 186. [GUO Chaoxu, CUI Peng. Fine particle migration in wide grading and poorly consolidated soil: An overview [J] . *Mountain Research*, 2017, 35(2): 179 - 186. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 黄海,刘建康,杨东旭.泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 161 - 168. [HUANG Hai, LIU Jiankang, YANG Dongxu. A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 161 - 168. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 万飞鹏,杨为民,邱占林,等.甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化 [J/OL] . 中国地质, 2022: 1 - 19. (2022-06-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20220621.1148.008.html>. [WAN Feipeng, YANG Weimin, QIU Zhanlin, et al. Disaster mechanism and evolution of Nagune gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province [J/OL] . *Geology in China*, 2022: 1 - 19. (2022-06-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20220621.1148.008.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 黄健,胡卸文,金涛,等.四川西昌“3·30”火烧区响水沟火后泥石流成灾机理 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 15 - 22. [HUANG Jian, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Mechanism of the post-fire debris flow of the Xiangshui gully in “3-30” fire area of Xichang, Sichuan Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 15 - 22. (in Chinese with English abstract)]