

# 稀性泥石流冲击力随机分布特征实验研究

黄远红<sup>1,2,3</sup>, 胡凯衡<sup>1,2</sup>, 唐金波<sup>1,2</sup>, 李 浦<sup>1,2,3</sup>

(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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 泥石流的冲击力具有很强的随机性。为研究泥石流冲击力变化规律、随机分布特征及冲击力与粗颗粒的关系, 用云南蒋家沟泥石流流原状土开展 7 组大型稀性泥石流冲击力水槽实验。实验结果表明: (1) 泥石流冲击力比例系数随粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大, 二者之间存在良好指数经验关系; (2) 用 6 种概率密度函数拟合了泥石流冲击力的分布, 发现 Log-Logistic 函数最适合描述冲击力的分布; (3) 冲击力分布的 Log-Logistic 函数的尺度参数  $\mu$  和形状参数  $s$  随粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大, 并得到尺度参数和形状参数与粗颗粒无量纲最大粒径之间的对数经验关系。

**关键词:** 工程地质; 稀性泥石流; 粗颗粒; 冲击力; Log-Logistic 函数; 随机关系

**中图分类号:** P 694

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2018)增 2-3918-08

## Experimental study of random distribution characteristics of diluted debris-flow impact forces

HUANG Yuanhong<sup>1,2,3</sup>, HU Kaiheng<sup>1,2</sup>, TANG Jingbo<sup>1,2</sup>, LI Pu<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Debris-flow impact force exhibits strong randomness due to irregular shape and motion of coarse particles in the flow. In order to examine the influence of grain size on the impact force and its characteristics of random distribution, seven groups tests of debris-flow impact forces were carried out by large-scale flume in the Dongchuan station, Chinese Academy of Sciences. The material used in the tests originates from Jiangjia Ravine's debris-flow deposition and the grain size is up to 8 cm. The experimental results indicate: the dimensionless impact force of debris-flow increases with the dimensionless maximum size of coarse particles, and there is a good exponential empirical relationship between them. The Log-Logistic probability density function is the best one to describe the distribution of the impact force among six probability density functions. The values of the Log-Logistic function's scale and shape parameters increase with the dimensionless maximum size of coarse particles, showing the logarithmic empirical relationships between the parameters and size.

**Key words:** engineering geology; diluted debris flow; coarse particle; impact force; log-logistic function; random relationship

**收稿日期:** 2017-07-06; **修回日期:** 2017-09-05

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41371039); 国家自然科学基金青年基金项目(41601011); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(Y3K2040040)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos.41371039 and 41601011) and Open Foundation of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences(Grant No. Y3K2040040)

**作者简介:** 黄远红(1992-), 男, 2014 年毕业于河南大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事山地灾害防治工程方面的研究工作。Email: 18681633358@163.com。通讯作者: 胡凯衡(1975-), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。Email: khhu@imde.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0828

## 1 引言

泥石流是典型的多相流体，含有大量的砾石、块石，甚至巨石。泥石流冲击力由浆体冲击力和粗颗粒冲击力组成。其中，造成构筑物破坏的主要原因是石块等粗颗粒产生的巨大冲击力<sup>[1-2]</sup>。如，1981年发生的成昆铁路利子依达沟大桥被泥石流冲毁事件中，利子依达大桥桥墩抗冲击力值大约为 2 000 t，泥石流浆体冲击力约为 149 t，而粗颗粒冲击力大约为 4 783 t。可见粗颗粒的冲击力是泥石流破坏作用的主要因素<sup>[3-4]</sup>。

从野外真实采集的泥石流冲击力信号可以看出，泥石流冲击力具有较强的随机性<sup>[5]</sup>。S. Zhang<sup>[6]</sup>将泥石流冲击力信号概括为 3 种形式：锯齿型脉冲、矩形脉冲、尖峰型脉冲。液相冲击力为均匀稳定的流体动压力，其冲击力信号表现为平稳；粗颗粒冲击力为非均匀非稳定的冲击动压力，其冲击力信号表现为脉动、跳跃，故泥石流冲击力随机性强主要是由于泥石流粗颗粒冲击力随机性强。

粗颗粒冲击力的随机性源自几个方面：(1) 粗颗粒大小不一、形状与分布不规则，呈现出随机分布的特征；(2) 泥石流运动过程中粗颗粒速度不均匀、脉动性强，颗粒间碰撞随机性强；(3) 粗颗粒与障碍物碰撞时的位置、角度和接触时间等也具有一定的随机性。K. H. Hu 等<sup>[5]</sup>通过野外测得泥石流冲击力数据研究发现，粗颗粒冲击力在泥石流不同流深处是不相同的，同时粗颗粒冲击力远远大于浆体冲击力。胡桂胜等<sup>[7]</sup>通过对三眼峪沟泥石流野外调查发现，粗颗粒大小相差很大，从几厘米到十几米；形状千差万别，有菱形状、角锥状、棱柱状等。陈洪凯等<sup>[8]</sup>通过冲击力模型试验研究发现，泥石流冲击力累积分布荷载呈反“S”型线性分布，当粗颗粒粒径越小时，其特征就越明显。曾超等<sup>[9]</sup>通过小型水槽实验，得到泥石流粗颗粒冲击力在时间、深度上分布具有一定的随机性，粗颗粒冲击次数与其质量比呈正相关。何晓英等<sup>[10]</sup>通过水槽模型实验，改变泥石流的流体性质从而研究泥石流内在变化规律，得到泥石流冲击力随单因素变量变化的规律。D. Song 等<sup>[11]</sup>研究了颗粒的浓度对冲击力的影响，认为作用于坝体上的静压力是主要的贡献。

在泥石流冲击力计算方面，C. Lichtenhalln<sup>[12]</sup>基于流体静力学提出了一维静力泥石流冲击力计算公式，认为经验系数  $k$  取值范围为 2.8 ~ 4.4；M.

Watanabe 和 H. Ikeya<sup>[13]</sup>通过调查分析樱岛火山泥石流，提出了一维动力泥石流冲击力计算公式，其经验系数对于层流明显且粗颗粒较小时可以取为 2；H. K. Chen 等<sup>[14]</sup>将泥石流简化为两相流，基于牛顿第二定律计算了泥石流液相和粗颗粒的冲击力；K. H. Hu 等<sup>[5, 15]</sup>采用流体力学中的动水压力公式计算泥石流液相冲击力；吴积善<sup>[16]</sup>将拦砂坝等构筑物看成是悬臂梁或简支梁，基于材料力学得到了泥石流粗颗粒冲击力计算公式；T. Mizuyama<sup>[17]</sup>以弹性碰撞理论为依据，对泥石流粗颗粒冲击力理论进行了修正，得到粗颗粒冲击力计算公式；何思明等<sup>[18]</sup>以 Hertz 理论为基础，结合弹塑性力学给出了泥石流粗颗粒冲击力计算表达式；陈剑等<sup>[19]</sup>进一步以 Hertz 接触理论和结构力学为基础，建立泥石流大块石对桥梁的冲击模型；T. Sarpkaya 和 M. Isaacson<sup>[20]</sup>考虑泥石流粗颗粒与构筑物之间的有效刚度，建立了基于接触刚度法的泥石流粗颗粒冲击力计算公式；F. Vagnon 和 A. Segalini<sup>[21]</sup>考虑了拖曳力对泥石流冲击力的影响，建立了一个同时考虑泥石流静水压、动水压及泥石流拖曳力的冲击力计算公式。

上述方法<sup>[12-21]</sup>大多数是确定性计算方法。这些方法在确定石块粒径、泥石流运动速度和密度等参数条件下，只能得到冲击力的唯一值，而无法反映泥石流冲击力的随机分布特性。陈洪凯等<sup>[8]</sup>的实验表明，即使在颗粒粒径等相同的条件下，泥石流的冲击力差异较大。因此，需要采用概率统计的方法来研究泥石流冲击力的分布。本文开展了稀性泥石流冲击力的大型水槽实验，初步研究了泥石流冲击力变化规律、随机分布特征，以及分布特征参数与粗颗粒粒径的关系，可为泥石流冲击力的研究和计算提供参考。

## 2 大型水槽实验装置与条件

### 2.1 实验装置

实验在中国科学院东川泥石流观测站露天实验场开展。实验装置包括泥石流供水系统、大型模拟试验水槽、冲击力测量系统三部分(见图 1)。主水槽长 47.25 m，宽 0.7 m，高 1.2 m。水槽的尺寸一方面可以提高实验中粗颗粒粒径的上限，另一方面可以尽量接近自然泥石流的动力条件。

实验所用供水系统提供恒定的水流，预计每次实验水深为 50 cm。沟道实验槽坡降为 20%。每次实验时，在实验槽里面铺满 5 cm 的土，铺设长度为



图1 大型水槽供水系统和实验装置

Fig.1 Water supply system and the experimental setup of large flume

25 m，以作为泥石流的物源。主要数据采集装置有冲击力传感器、泥深测量仪。冲击力传感器受力面长 5 cm、宽 2.01 cm，传感器量程为 50 kg，采样频率为 2 000 Hz，可记录泥石流瞬时冲击信号，其综合误差为 0.02%。传感器固定于铝合金装置上，铝合金装置高度为 14 cm，厚度 0.5 cm，宽度 5 cm，布置于水槽出口上游 50 cm 处。6 个冲击力传感器垂直排列，由下至上为 1#~6#。传感器中心离地高度分别为 15, 37, 59, 81, 103, 125 mm。传感器连接冲击力信号放大器，放大器连接数据采集仪，数据采集仪将泥石流冲击力信号传输到电脑上(见图 2)。

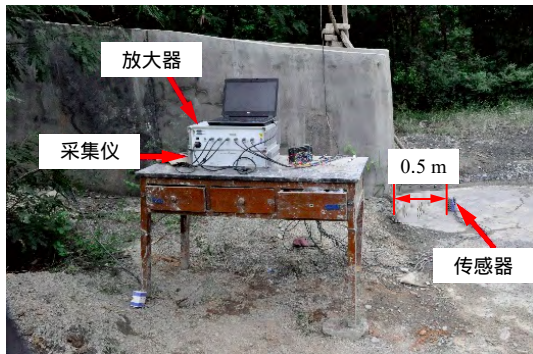


图2 泥石流冲击力信号采集系统

Fig.2 Collecting system of debris-flow impact force signal

为方便测算泥石流流速，在实验水槽出口的前方 1 m 处，每隔 5 cm 画一条红线作为标记，然后通过摄像机采集视频进行读帧来计算泥石流流速，以便获取泥石流初始龙头流速，读帧频率为 25 帧/s。M. Arratano 等<sup>[22-24]</sup>采用这种方法获得泥石流的龙头流速。实验时，在距水槽出口 5, 10 m 两点处分别用取样桶取样，计算两点泥石流密度均值作为每次实验泥石流密度。实验土样取自东川蒋家沟泥石流堆积物，然后按照实验设定的最大粒径上限分别过筛。

### 2.2 实验条件

首先，在大型实验水槽出口 0.5 m 处安装泥石流冲击力传感器装置；接着，在水槽内均匀铺设筛

分好的土体，同时通过水泵进行蓄水，当供水系统装置达到高度约为 0.5 m 时，供水停止；最后提拉阀门从而形成泥石流。实验测得泥石流密度范围为 1 556~1 731 kg/m<sup>3</sup>，均为稀性泥石流。

在水槽的正面，侧面，上面 3 个方向分别架设 DV，记录泥石流形成、泥石流冲击力形态、泥石流流速等。总共进行 1 组清水冲击实验 7 组泥石流冲击实验，其土体最大粒径分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 cm(见图 3)。

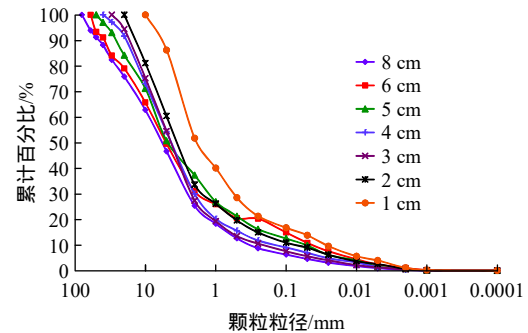


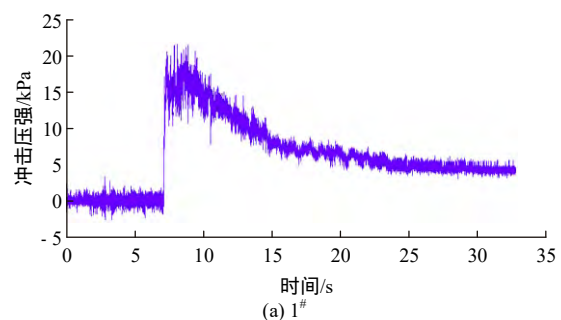
图3 实验泥石流土体样品颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size curves of experiment debris-flow soil

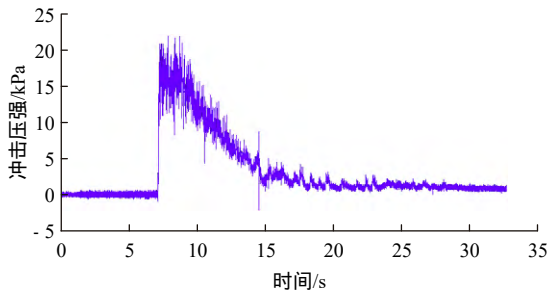
### 3 泥石流冲击力数据处理

在采集冲击力信号的过程中，一方面由于实验装置的振动，另一方面由于浆体脉动的影响，数据采集仪得到的泥石流冲击力信号中含有噪声。目前冲击力信号降噪主要有移动平均法<sup>[5]</sup>和小波降噪<sup>[15]</sup> 2 种方式，本文基于前人的研究成果，选取小波降噪的方法去除泥石流中的噪声。在清水冲击时，其流深大约为 65 mm，第三个传感器高度为 59 mm。故只有 1#~3# 传感器冲击力信号为清水冲击所致(见图 4)，4#~6# 为清水激起所致。

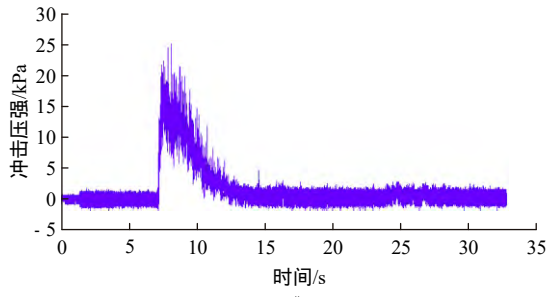
在大型水槽清水冲击实验中，1#~3# 传感器冲击力分别为 20.50, 21.47, 23.86 kPa。由 2# 传感器泥石流冲击力信号降噪结果(见图 5)可知，降噪以后信号整体形态和降噪之前类似，降噪以后的信号少了一些高频噪声导致的波动，同时冲击力信号的幅值略有下降。



(a) 1#



(b) 2<sup>#</sup>



(c) 3<sup>#</sup>

图 4 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>传感器清水冲击力原始信号

Fig.4 Water impact force original signals of sensors #1 - #3

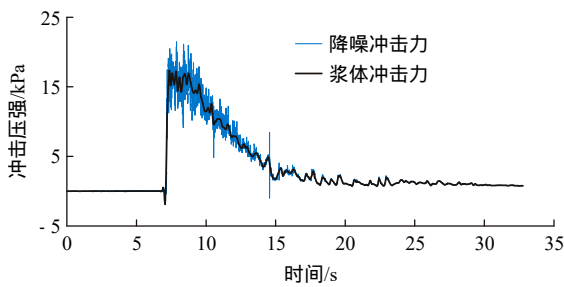


图 5 2<sup>#</sup>传感器冲击力降噪信号和浆体冲击力信号

Fig.5 Impact force denoised signal and slurry impact force signal of sensor #2

小波降噪选取 Daubechies 小波基函数，进行 8 层分解。分解至 8 层时得到的低频信号 a8 是一条相对平滑且连续的曲线。泥石流是一种固、液两相流体，液相是由水和细颗粒(小于 2 mm)组成<sup>[25]</sup>，固相由粗颗粒组成。液相得到的冲击力曲线由于浆体的流动具有稳定性，应该相对平滑同时连续；而固相得到的冲击力，由于颗粒的随机运动，具有离散性

以及跳跃性<sup>[15]</sup>。因此可以考虑将降噪以后的低频 a8 信号作为泥石流液相冲击力信号，将整体泥石流信号减去浆体冲击力信号，可得到粗颗粒冲击力信号。

## 4 实验结果分析

### 4.1 粗颗粒粒径与泥石流冲击力的关系

为单纯分析粗颗粒粒径与冲击力的关系，需要消除泥石流流速和密度等的影响。因为本实验采用的是水动力形成泥石流的方式，实验中难以控制泥石流流速和密度。为此，以泥石流流速的二次方与密度的乘积作为特征量，对实验测量的泥石流冲击力进行无量纲化得到泥石流冲击力与浆体冲击力的比例系数<sup>[4, 13, 26-27]</sup>(见表 1)。由于泥石流冲击力是泥石流土体共同作用的结果，具有较强的群体效应，并非单个粗颗粒冲击所致。为了减少单个粗颗粒对实验结果的影响，采用最大粒径  $D_{max}$  除以  $D_{50}$  作为泥石流无量纲最大粒径(见表 1)。这样也保证了泥石流冲击力公式左、右两边量纲守恒。7 组土体样品的最大粒径分别为 80, 60, 50, 40, 30, 20, 10 mm，对应的  $D_{50}$  分别为 5.85, 5.04, 4.95, 4.3, 4.2, 3.6, 1.9 mm，在对应的泥石流冲击实验中测得的泥石流泥深分别为 101, 87, 92, 86, 85, 112, 125 mm，平均泥深为 98.2 mm。第 4 个传感器中心离地高度为 81 mm，据此认为 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>冲击力信号为泥石流冲击所致，5<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>冲击力信号为泥石流溅起所致，故只分析 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>传感器。

由图 6 可知，泥石流冲击力比例系数随着泥石流粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大，具有一定的波动性。为了拟合泥石流粗颗粒无量纲最大粒径和泥石流冲击力比例系数之间的经验关系，将在同一无量纲最大粒径条件下的 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>传感器泥石流冲击力比例系数取平均值，作为该粒径条件下泥石流冲击力比例系数(见表 1)。分析发现，泥石流冲击力比

表 1 7 组泥石流冲击力数据

Table 1 Impact force data of 7 groups of debris flow

无量纲最大粒径	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1 <sup>#</sup> 冲击力 比例系数	2 <sup>#</sup> 冲击力 比例系数	3 <sup>#</sup> 冲击力 比例系数	4 <sup>#</sup> 冲击力 比例系数	1 <sup>#</sup> ~4 <sup>#</sup> 冲击力 比例系数均值
13.68	1 673	6.3	8.85	8.08	12.07	8.62	9.41
11.90	1 731	5.5	8.04	8.67	11.19	6.92	8.70
10.10	1 712	5.9	6.44	7.25	6.89	5.49	6.52
9.30	1 571	6.0	4.95	7.06	6.46	6.56	6.26
7.14	1 634	6.6	3.31	4.67	4.27	4.19	4.11
5.56	1 678	6.0	2.10	5.60	2.32	1.53	2.89
5.26	1 556	6.6	1.14	1.31	1.15	0.88	1.12

注：无量纲最大粒径为最大粒径  $D_{max}$  除以  $D_{50}$ 。

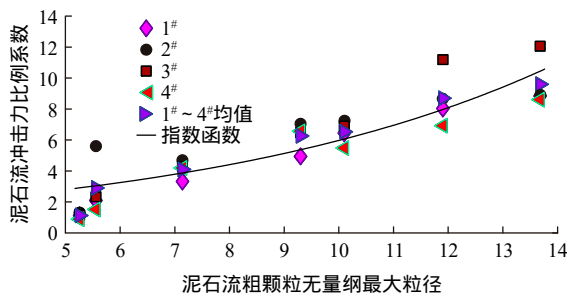


图 6 泥石流冲击力比例系数变化规律

Fig.6 Fitting curve of the coefficient of debris-flow impact force with the dimensionless maximum grain size

例系数与泥石流粗颗粒无量纲最大粒径之间存在良好的指数关系：

$$\frac{F}{\rho v^2} = 1.307e^{0.152 \frac{D_{max}}{D_{50}}} \quad (R^2 = 0.9) \quad (1)$$

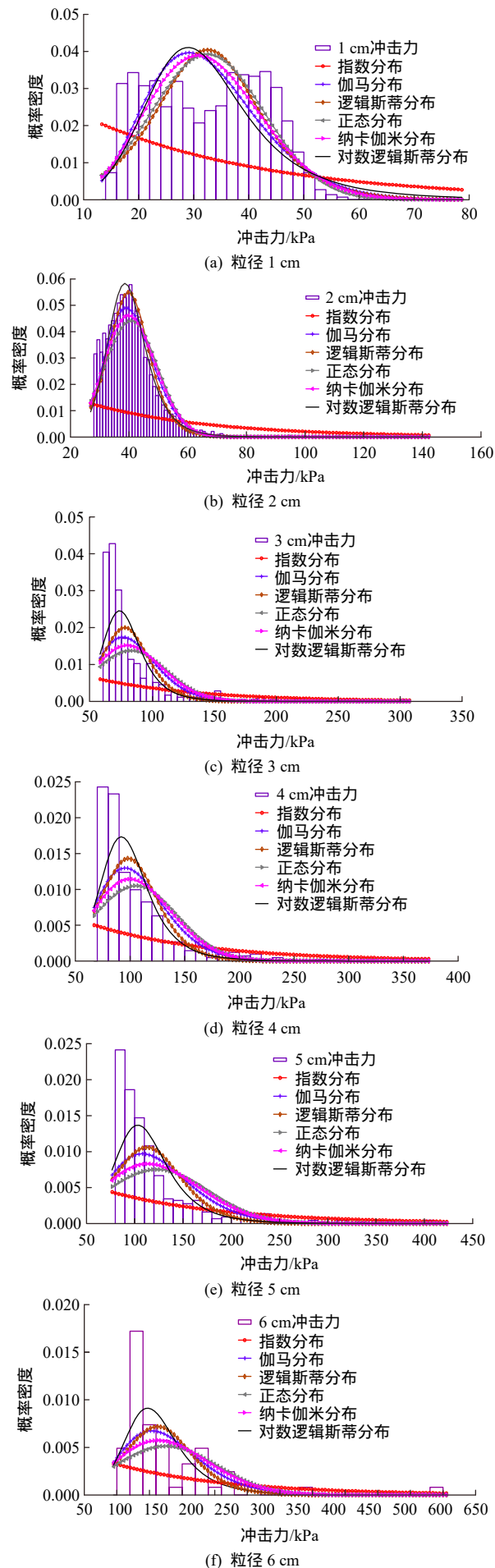
式中： $F$  为泥石流冲击力(kPa)， $\rho$  为泥石流密度( $kg/m^3$ )， $v$  为泥石流流速(m/s)， $F / (\rho v^2)$  为泥石流冲击力比例系数， $D_{max}$  为泥石流土体最大粗颗粒粒径(mm)，其中，系数 1.307 的 90%置信区间为[0.519, 2.095]，系数 0.152 的 90%置信区间为[0.1, 0.204]。

### 4.2 泥石流冲击力随机分布特征

泥石流冲击力随机性强，为了研究泥石流冲击力与粗颗粒的内在随机关系特征，首先拟合泥石流冲击力概率密度函数。在 Matlab 中分别用 Exponential, Gamma, Logistic, Normal, Nakagami, Log-Logistic 等函数进行冲击力概率密度函数拟合。同时，由于粗颗粒主要集聚于泥石流中上部，为了突出粗颗粒对冲击力的影响，对 1~8 cm 范围的 7 组 3#传感器冲击力数据进行拟合分析。

1 cm 粗颗粒冲击力分布相对均匀，这主要因为过筛大于 1 cm 的粗颗粒后，细颗粒较多，细颗粒与水混合较为均匀，龙身冲击力能够持续一定时间，大小为 40 kPa 左右，龙尾冲击力也能够持续一定时间，大小为 23 kPa 左右，表现出了相对均匀分布的特征。也就是说颗粒较细的情况下，泥石流的冲击力特征类似于浆体的冲击力。对上述 7 组冲击力数据进行概率密度函数拟合，均发现 Log-Logistic 函数拟合效果最好(见图 7)。以粗颗粒粒径 2 cm 为例，通过对数似然值、方差 2 个指标(见表 2)进行分析说明。

从表 2 可知，Log-Logistic 函数拟合对数似然值最大、方差最小，故应采用 Log-Logistic 拟合冲击力概率密度函数效果最好。



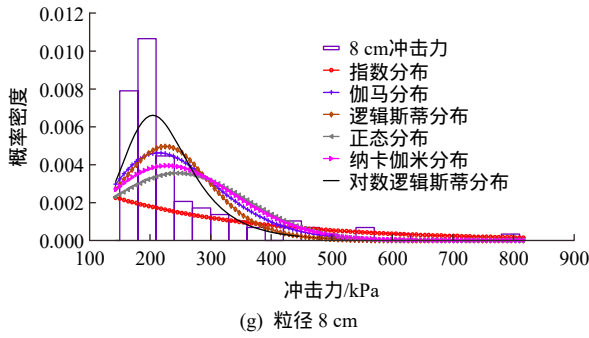


图 7 粒径 1 ~ 8 cm 粗颗粒冲击力概率密度函数拟合  
Fig. 7 Fitting impact force probability density function of coarse particle sizes 1 – 8 cm

表 2 粗颗粒粒径 2 cm 各函数对数似然值和方差

Table 2 Logarithmic likelihood and variance of each function of coarse particle size 2 cm

函数名	对数似然值	方差
Exponential	- 28 650.4	1 655.88
Gamma	- 21 422.5	68.55
Logistic	- 21 484.0	67.97
Normal	- 22 033.0	81.49
Nakagami	- 21 714.5	74.03
Log-Logistic	- 21 132.0	67.62

### 4.3 冲击力与粗颗粒粒径的关系

Log-Logistic 函数为用于非负随机变量的连续概率密度函数，同时经常运用于随机变量先增大后减少的数学模型中<sup>[28]</sup>。对于较大的随机变量值，Log-Logistic 按代数式减小，而非指数式减小，故 Log-Logistic 概率密度函数形状与标准对数函数相似，但是有更长的尾部<sup>[29]</sup>。Log-Logistic 函数常被学者用于医学中进行生存分析(survival analysis)<sup>[30]</sup>，水文学中预测地表径流(stream flow)<sup>[28, 31]</sup>、经济学中财富和收入分布<sup>[32]</sup>。

Log-Logistic 概率分布函数为

$$F(x; \mu, s) = \frac{\frac{1}{x^s}}{e^s + \frac{1}{x^s}} \quad (2)$$

Log-logistic 概率密度函数为

$$f(x; \mu, s) = \frac{1}{se^u} \frac{(xe^{-u})^{\frac{1}{s}-1}}{\left[1 + (xe^{-u})^{\frac{1}{s}}\right]^2} \quad (3)$$

式中： $F(x; \mu, s)$  为随机变量  $x$  的概率累计分布函数；其中， $\mu$  为尺度参数， $s$  为形状参数。

在 Matlab 中，通过拟合 7 组 1<sup>#</sup> ~ 4<sup>#</sup> 传感器泥石流冲击力 Log-Logistic 概率密度函数，得到对应 Log-Logistic 函数的尺度参数  $\mu$  和形状参数  $s$  (见表 3)。为了减少冲击力实验误差，在拟合经验关系时，本文采用 1<sup>#</sup> ~ 4<sup>#</sup> 传感器冲击力概率密度函数尺度参数  $\mu$  和形状参数  $s$  的均值。为了单纯分析尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$  与粗颗粒粒径之间的关系，采用泥石流冲击力比例系数、泥石流粗颗粒无量纲最大粒径进行分析。

从图 8 可知，尺度参数  $\mu$  和形状参数  $s$  总体上随着泥石流粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大，具有一定的波动性。基于 Log-Logistic 函数性质，泥石流冲击力概率密度函数尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$  和泥石流粗颗粒无量纲最大粒径用对数函数拟合效果较好(拟合系数的 95% 置信区间、和方差见表 4)：

$$\mu = 1.59 \ln \left( \frac{D_{\max}}{D_{50}} \right) - 3.169 \quad (R^2 = 0.936) \quad (4)$$

$$s = 0.058 \ln \left( \frac{D_{\max}}{D_{50}} \right) + 0.026 \quad (R^2 = 0.917) \quad (5)$$

表 3 粗颗粒无量纲最大粒径、密度、流速、尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$

Table 3 The dimensionless maximum size, density, velocity, scale parameters  $\mu$  and shape parameters  $s$  of coarse particles

无量纲最大粒径	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	流速/ (m · s <sup>-1</sup> )	1 <sup>#</sup>		2 <sup>#</sup>		3 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>		1 <sup>#</sup> ~ 4 <sup>#</sup>	
			$\mu$	$s$	$\mu$	$s$	$\mu$	$s$	$\mu$	$s$	平均 $\mu$	平均 $s$
13.68	1 673	6.3	0.817	0.159	0.798	0.162	1.191	0.179	0.886	0.226	0.923	0.182
11.90	1 731	5.5	0.737	0.169	0.398	0.165	1.100	0.180	0.642	0.176	0.719	0.173
10.10	1 712	5.9	0.551	0.165	0.633	0.148	0.611	0.172	0.400	0.163	0.549	0.162
9.30	1 571	6.0	0.172	0.140	0.591	0.140	0.535	0.153	0.498	0.132	0.449	0.141
7.14	1 634	6.6	-0.190	0.163	0.156	0.133	0.070	0.136	0.215	0.133	0.064	0.141
5.56	1 678	6.0	-0.230	0.143	0.231	0.130	-0.430	0.110	-0.590	0.123	-0.251	0.127
5.26	1 556	6.6	-0.830	0.142	-0.750	0.142	-0.760	0.101	-0.910	0.114	-0.812	0.125

注:无量纲最大粒径为最大粒径  $D_{\max}$  除以  $D_{50}$ 。

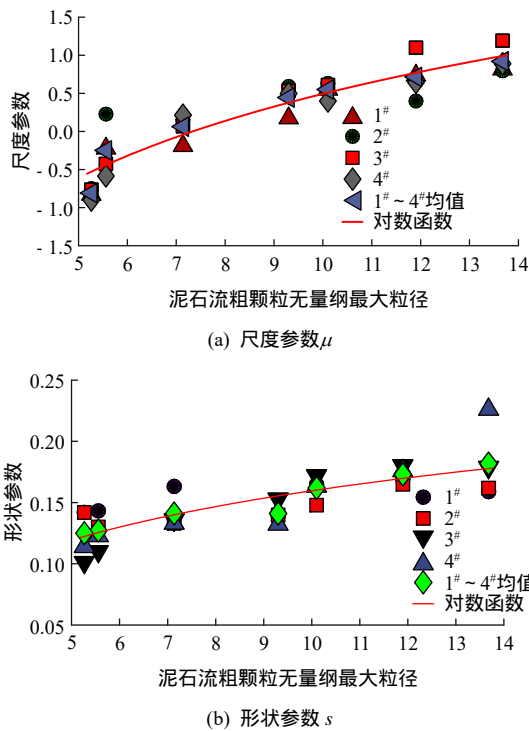


图 8 尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$  与无量纲最大粒径的拟合关系

Fig.8 The fitting relationships between the dimensionless maximum size and  $\mu$  and  $s$

表 4 拟合关系各项系数的 95%置信区间、和方差

Table 4 95% confidence limit of the coefficient and SSE of fitting relationship

拟合关系	对数项	常数项	和方差
尺度参数 $\mu$	[1.113, 2.069]	[- 4.206, - 2.134]	0.142
形状参数 $s$	[0.038, 0.078]	[- 0.018, 0.069]	0.000

### 5 结 论

为了更加接近真实泥石流的冲击实际情况，采用原状泥石流土样，开展泥石流 7 组大型水槽冲击力实验。对小波降噪后得到的冲击力数据进行了统计分析，得到以下几点结论：

(1) 泥石流冲击力比例系数随着粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大，具有一定的波动性。用指数关系拟合了泥石流冲击力比例系数与粗颗粒无量纲最大粒径之间经验关系。

(2) 研究泥石流冲击力随机分布特征，利用 Exponential, Gamma, Logistic, Normal, Nakagami, Log-Logistic 等函数对泥石流冲击力数据进行概率密度函数拟合，发现 Log-Logistic 函数拟合效果最好。

(3) 泥石流冲击力概率密度 Log-Logistic 函数的尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$  随着泥石流粗颗粒无量纲最大粒径增大而增大，基于 Log-Logistic 函数性质，采用对数关系拟合了尺度参数  $\mu$ 、形状参数  $s$  和泥石流粗颗粒无量纲最大粒径之间的关系。

基于本文的实验结果，可以提供一种基于概率统计的泥石流冲击力计算方法，即通过实际调查泥石流粗颗粒粒径、流速、密度等物理特性，确定泥石流冲击力概率密度函数，然后结合工程实例，以一定的累积概率值确定泥石流冲击力工程设防值。当然，这需要后续对原型泥石流和工程破坏进行更深入的研究和分析。

### 参考文献(References) :

[1] MITSUYAMA T. Evaluation of impact of debris flow on check dams[J]. Journal of Japan Society of Erosion Control Engineering, 1979, 32(1) : 40 - 49.

[2] 钱宁, 王兆印. 泥石流运动机理的初步探讨[J]. 地理学报, 1984, 39(1) : 1 - 33.(QIAN Ning, WANG Zhaoyin. A preliminary study on the mechanism of debris flow[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(1) : 33 - 43.(in Chinese))

[3] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989 : 162 - 163.(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources. Research and prevention of debris flow[M]. Chengdu : Sichuan Science and Technology Press, 1989 : 162 - 163.(in Chinese))

[4] ZHANG S, CHEN J. An experimental study : Integration device of Fiber Bragg grating and reinforced concrete beam for measuring debris flow impact force[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(8) : 1 526 - 1 536.

[5] HU K H, WEI F Q, LI Y. Real-time measure and preliminary analysis of debris flow impact force at Jiangjia Ravine, China[J]. Earth Surface Process and Land-forms, 2011, 36(9) : 1 268 - 1 278.

[6] ZHANG S. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China[J]. Natural Hazards, 1993, (7) : 1 - 23.

[7] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析[J]. 地球与环境, 2011, 39(4) : 478 - 484.(HU Guisheng, CHEN Ningsheng, DENG Mingfeng, et al. Analysis of the characteristics of impact force of massive stones of the Sanyanyu debris flow gully in Zhouqu, Gansu Province. [J]. Earth and Environment, 2011, 39(4) : 478 - 484.(in Chinese))

[8] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福, 等. 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8) : 124 - 127.(CHEN Hongkai, TANG

- Hongmei, XIAN Xuefu, et al. Probability distribution characteristics of pulsating load formed by debris flow impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 124–127.(in Chinese)
- [9] 曾超, 苏志满, 雷雨, 等. 泥石流浆体与大颗粒冲击力特征实验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1 923–1 930.(ZENG Chao, SU Zhiman, LEI Yu, et al. An experimental study of the characteristics of impact forces between debris flow slurry and large-sized particle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1 923–1 930.(in Chinese))
- [10] 何晓英, 唐红梅, 陈洪凯. 浆体黏度和级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性模型实验[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(5): 977–982.(HE Xiaoying, TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Experiment study on impacting characteristic of debris flow considering different slurry viscosities, soil phase ratios and grain diameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(5): 977–982.(in Chinese))
- [11] SONG D, NG C W W, CHOI C, et al. Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(10): 1 421–1 434.
- [12] LICHTENHAHN C. Die Berechnung von sperren in beton und eisenbeton. kolloquiumüber Wildbach-sperren[J]. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesanstalt Wien*, 1973, 102: 91–127.
- [13] WATANABE M, IKEYA H. Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima, Japan[J]. *Erosion Sediment Transport Measurement*, 1981, 33: 245–256.
- [14] CHEN H K, TANG H M, CHEN Y Y. Research on method to calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris flow[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, 27(3): 399–408.
- [15] 唐金波, 胡凯衡, 周公旦, 等. 基于小波分析的泥石流冲击力信号处理[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2013, 45(1): 8–13.(TANG Jinbo, HU Kaiheng, ZHOU Gongdan, et al. Debris flow impact pressure signal processing by the wavelet analysis[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science*, 2013, 45(1): 8–13.(in Chinese)).
- [16] 吴积善. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 185–191.(WU Jishan. *Debris flow and comprehensive management*[M]. Beijing: Science Press, 1993: 185–191(in Chinese))
- [17] MIZUYAMA T. Computational method and some considerations on impulsive force of debris flow acting on Sabodams[J]. *Erosion Control*, 1979, 11(2): 40–43.
- [18] 何思明, 李新坡, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1 664–1 669.(HE Siming, LI Xinpo, WU Yong. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1 664–1 669.(in Chinese))
- [19] 陈剑, 王全才, 陈颖琪, 等. 基于 Hertz 理论的泥石流大块石冲击力修正计算[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 124–129.(CHEN Jian, WANG Quancai, CHEN Yingqi, et al. Amending calculation on impact force of boulders in debris flow based on Hertz theory[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 124–129.(in Chinese))
- [20] SARPKEYA T, ISAACSON M. *Mechanics of wave force on offshore structures*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981: 231–236.
- [21] VAGNON F, SEGALINI A. Debris flow impact estimation on a rigid barrier[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(7): 1 691–1 697.
- [22] ARATTANO M, MARCHI L. Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5(1): 137–142.
- [23] HÜRLIMANN M, RICKENMANN D, GRAF C. Field and monitoring data of debris flow events in the Swiss Alps[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 161–175.
- [24] GENEVOIS R, GALGARO A, TECCA P R. Image analysis for debris-flow properties estimation[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science*, 2001, 26(9): 623–631.
- [25] 王光谦, 邵颂东, 费俊祥. 泥石流模拟 I—模型[J]. *泥沙研究*, 1998, (3): 7–13.(WANG Guangqian, SHAO songdong, FEI Xiangjun. The simulation of debris flows: model[J]. *Journal of Sediment Research*, 1991, (3): 7–13.(in Chinese))
- [26] EGLI T. Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren[J]. *Mensuration Photogrammetrie Genie Rural*, 2000, 98(3): 120–125.
- [27] Lo DOK. Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design[R]. *Geotechnical Engineering Office, Geo Report No.104*. Hong Kong: Civil Engineering Department, 2000.
- [28] ASHKAR F, MAHDI S. Fitting the log-logistic distribution by generalized moments[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3): 694–703.
- [29] ROSAIAH K, KANTAM R R L, KUMAR S. Reliability test plans for exponentiated log-logistic distribution[J]. *Economic Quality Control*, 2006, 21(2): 279–289.
- [30] COLLETT D. *Modelling survival data in medical research*[M]. [S. l.]: CRC Press, 2015: 279–285.
- [31] ASHOFTEH P S, HADDAD O B, MARIÑO M A. Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change[J]. *Water resources management*, 2013, 27(1): 255–274.
- [32] ARYAL G R. Transmuted log-logistic distribution[J]. *Journal of Statistics Applications and Probability*, 2013, 2(1): 11.