

文章编号: 1008 - 2786 - (2018)6 - 889 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000384

# 泥石流性质和规模对声波特性影响的实验研究

袁 路<sup>1,2</sup>, 胡雨豪<sup>4</sup>, 马东涛<sup>1,3\*</sup>, 李 梅<sup>5</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 4. 中煤科工集团重庆设计研究院, 重庆 400016;

5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘 要:** 泥石流的声波是泥石流声波预警的重要媒介, 声波的特性从一定程度上可以反映泥石流的性质和规模。通过开展容重为  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  和不同流量(规模)的 34 次室内泥石流实验, 采集了泥石流流速、流量(规模)数据及声波信号, 采用短时傅里叶变换(STFT)和滤波器对声波信号进行处理, 分析研究了泥石流容重、流量对声波最大振幅、时域频域、声波能量的影响规律。实验表明: 声波振幅的高低可反映泥石流规模的大小, 泥石流声波最大振幅与流量表现出线性正相关性; 泥石流声波最大振幅随容重呈线性增长趋势, 拟合函数系数与容重满足线性正相关性, 据此可以估算泥石流的峰值流量及规模; 不同容重的泥石流声波能量分布频带不同, 稀性泥石流的声波能量均匀分布在高(Band3)、中(Band2)、低(Band1)三个频带上, 过渡性泥石流的声波能量集中在中、高两个频带上, 粘性泥石流的声波能量集中在中、低两个频带上。通过对声波能量分布的分析, 可以对泥石流的性质和类型进行判别。

**关键词:** 泥石流; 性质; 规模; 声波; 振幅; 频率

**中图分类号:** P642. 23

**文献标志码:** A

泥石流流体在运动过程中扰动空气形成声波<sup>[1,2]</sup>, 次声是声波中频率低于 20 Hz 的低频部分。泥石流次声警报法是通过采集和处理次声波信息来警报泥石流的一种警报方法<sup>[3]</sup>。较之一般常见其它预警方法, 次声警报法具有传播距离远、衰减小、较长的警报提前量、非接触、设备不易受损等优点, 是目前国内外泥石流预警报、防灾减灾常用的技术手段之一<sup>[4,5]</sup>。

泥石流次声在野外采集中极容易受到环境噪音的干扰, 通过分析泥石流次声频域特征可对泥石流次声和环境噪音进行区别<sup>[6]</sup>。因此, 早期的研究多关注泥石流次声信号的频域特征及其影响因素。通

过对野外泥石流次声信号的采集, 统计得到泥石流次声信号的频率分布范围及峰值频率特征, 认为泥石流浆体浓度、固体颗粒大小决定着泥石流次声信号频域特征<sup>[7-10]</sup>。同时通过对比泥石流和洪水在次声频谱上的差异, 发现洪水的次声频域往往趋于高频<sup>[11,12]</sup>。而在泥石流次声时域特征上只是定性描述了泥石流次声声压与影响因素之间的关系, 并未深入探讨其定量关系<sup>[7,13]</sup>。近几年泥石流次声定位算法的研究<sup>[14-16]</sup>、泥石流次声监测系统软件、硬件的优化设计<sup>[17-19]</sup>在一定程度上为泥石流次声预警的准确率奠定了基础。

在泥石流次声警报研究和实践中, 主要存在如

**收稿日期** (Received date): 2018 - 06 - 15; **改回日期** (Accepted date): 2018 - 09 - 29

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目(41572347)。[National Natural Science Foundation of China (41572347)]

**作者简介** (Biography): 袁路(1993 - ), 男, 四川资阳人, 硕士研究生, 研究方向: 山地地质灾害减灾工程与岩土工程。[YUAN Lu (1993 - ), male, born in Ziyang, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on geohazards prevention and geo-engineering] E-mail: yuanlu@imde. ac. cn.

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 马东涛(1965 - ), 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 研究方向: 地质灾害基础理论研究和防灾减灾工程实践。[MA Dongtao (1965 - ), male, born in Wugong, Shaanxi province. Ph. D., Professor, specialized in geohazards prevention theory and engineering] E-mail: dtma@imde. ac. cn

下三个方面的问题:一是缺乏泥石流流次声和类型、流速及流量等形成要素、流体性质、运动特征等的野外同步观测,导致目前无法实现对泥石流流性质、规模及危害范围的定量预报;二是对泥石流流次声的发生机理不清,缺乏野外观测和室内实验的有利支撑;三是目前多采用泥石流流次声部分进行报警,而忽略了泥石流流声波中的中高频部分信息,未充分利用声波信号,导致目前次声报警只能警报泥石流流的发生,虽漏报率低但误报率高,不能警报泥石流流的类型及规模大小,一定程度限制和影响了声波警报在泥石流流减灾防灾中的应用。

因此,在泥石流流野外次声波数据采集艰难的前提下,开展室内模拟实验不失为一种好的解决办法。本文将研究对象从次声拓展到可闻声,通过对不同容重(性质)、流量(规模)泥石流流进行室内水槽实验,同步采集泥石流流声波信号并对信号进行处理,以探索不同类型、规模的泥石流流声波的时域和频域特征,寻求泥石流流固有的声波特性,一方面可以为泥石流流类型和规模警报提供基础数据,同时可为泥石流流特征参数和临界阈值的设置及定量预报提供科学依据,也为泥石流流声波形成机理研究奠定一定的实验基础。

## 1 实验设计

### 1.1 实验装置

实验是在中国地质调查局探矿工艺研究所泥石流流滑坡实验室开展的。实验装置主要由料斗、水槽、尾料池、声波采集系统等四部分组成,如图1所示。其中,料斗为长方体,长100 cm,宽100 cm,高120 cm,下部设有闸门;水槽(试验槽)长度600 cm,内宽20 cm,深30 cm,底板为有机玻璃材质,侧面为钢化玻璃,并贴有刻度尺,以便观察泥位;尾料池为

木箱,同时采用小木板将水槽出口接引到尾料池底部,以减小泥石流流与尾料池的碰撞对声波信号采集的影响。

声波采集系统采用中国科学院声学研究所研发的IDS2016型声波采集系统,主要由声波传感器(ISD2016-C)、下位机(IDAS2016-A)和显示器等三部分组成。声波传感器量程 $-10\text{ V} \sim 10\text{ V}$ ,灵敏度 $50\text{ mV/Pa}$ ,布设在试验水槽中部,固定于悬空的支架上,以减少水槽振动对声波采集的干扰。下位机集采集数据、储存数据于一体,内置放大器,提高信号采集的灵敏度,同步精度高,保证数据完全同步、连续不断采集。显示器用于实时读取数据、数据回放及设置传感器的采集频率。本实验的采样频率为 $100\text{ Hz}$ 。

### 1.2 实验材料

在实验室分别配备容重为 $1.3\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.5\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ (稀性泥石流流)、 $1.7\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ (过渡性泥石流流)和 $2.0\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ (粘性泥石流流)等3类性质的泥石流流。模拟实验流体中,粘粒采用特级钠土,其以蒙脱石为主的含水粘土矿,pH值 $8.9 \sim 10$ ;细颗粒采用天然河沙,平均粒径 $1\text{ mm}$ ;粗颗粒采用粉碎的天然河床卵石,粒径分别为 $10\text{ mm}$ 和 $20\text{ mm}$ 。在准备物料时,参考了汶川地震灾区四川省绵阳市北川县陈家坝沟泥石流样品的级配曲线,考虑到颗粒最大粒径不得超过水槽宽度的 $1/5$ ,最终确定了实验泥石流流流体的颗粒级配(图2)。从图2可以看出,泥石流流样品中所占比例最多的粒径为 $2 \sim 20\text{ mm}$ 的砂砾,占总重量的 $62\% \sim 80\%$ , $0.075\text{ mm}$ 及以下的粉粘粒占 $5\% \sim 9.5\%$ 。

### 1.3 实验条件及流程

选取体积 $40\text{ L}$ ,容重为 $1.3\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.5\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.7\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.0\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 的泥石流流作为实验对象(表1)。实验中,通过改变泥石流流流体的

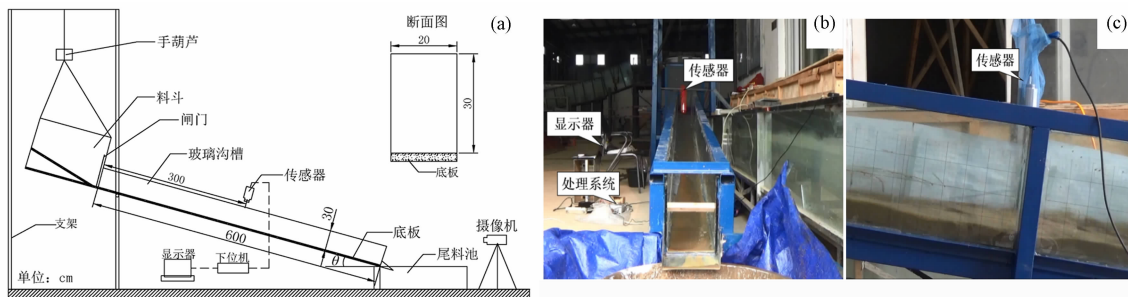


图1 实验装置示意图:(a)水槽尺寸示意图;(b)前视图;(c)侧视图

Fig. 1 Experiment apparatus: (a) dimensions; (b) front view; (c) side view

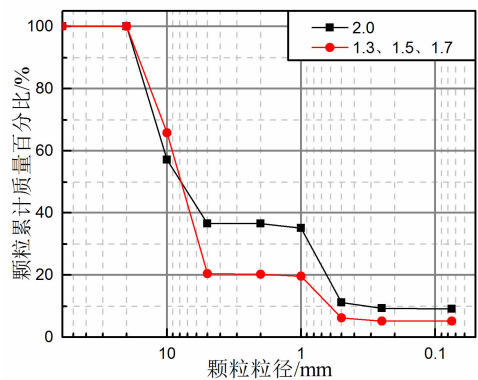


图2 实验泥石流颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain grading curve of experimental debris flow

容重和流量,采集其声波信号。模拟实验采用手动操作,通过手葫芦将实验水槽坡度调至一定角度,以便泥石流流体能够完全从料斗流出。确定试验水槽坡度后,将充分浸泡的泥石流物料搅拌均匀,装入料斗;在流体释放前,确保声波采集系统运行正常,并采集一定时长的背景噪音;实验中通过阀门控制泥石流的流量,在水槽正前方和中部侧面各安装一台摄像机,以记录整个流动过程,采用浮标法测定泥石流流体表面流速及流量。

表1 实验工况

Tab. 1 Experimental conditions

实验组别	I	II	III	IV
容重/( $t \cdot m^{-3}$ )	1.3	1.5	1.7	2.0
浆体浓度/%	3	6	9	30
流体性质	稀性		过渡性	粘性
实验组数	6	10	11	7

1.4 实验结果

共进行了4组容重的泥石流声波实验,共采集到泥石流声波信号34组,同时采集到10组实验背景噪音。实验结果见表2。

2 实验数据处理

2.1 声波信号预处理

通过泥石流声波采集仪采集的信号因外界干扰常出现非线性、非平稳和非光滑等特点,主要涉及到偏置电压、噪音信号(尤其是风)以及仪器漂移等因素造成的干扰,影响信号的真实值<sup>[20]</sup>。因此,必须对声波信号进行预处理。本研究采用滑动平均法对

声波信号进行预处理,以剔除掉信号趋势项、噪音信号和仪器漂移等干扰,得到真实的声波信号。

滑动平均法是通过沿信号序列滑动计算两个及以上信号点的平均值而形成一个新的序列,即是趋势项,通过原始信号减去趋势项则为去趋势项信号,即得到真实次声信号<sup>[21]</sup>。选取实验中一段时长为20 s的泥石流声波信号为例进行预处理说明,如图3所示。

2.2 时域分析与频率段分离

本实验通过分析原始波形获取其最大振幅,探究最大振幅与流量的量化关系。为探究声波信号能量分布随流量的变化,参照 Kogelnig A 等<sup>[11]</sup>的研究成果,利用 MATLAB 平台设计了三个滤波器,将信号划分为三个频带:5 ~ 20 Hz 频带(Band1),20 ~ 35 Hz频带(Band2)和35 ~ 50 Hz 频带(Band3),以Band1、Band2 和 Band3 分别代表信号的低频部分、中间频带和 高频部分,取各频带信号的最大振幅,分析流量和各频带最大振幅的关系,揭示能量分布的变化特征。

2.3 时频域特征处理

时频分析是分析声波信号能量在频率-时间平面上的分布和变化规律<sup>[22]</sup>。为获取实验泥石流声波信号的时频域特征,采用短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform,STFT)处理信号。短时傅里叶变换(STFT)即加窗傅里叶变换,其基本思想如下:信号为 $x(t)$ ,选择一个时频局部化的窗函数,假定分析窗函数 $g(t)$ 在一个短时间间隔内是平稳(伪平稳)的,移动窗函数 $g(t)$ 使信号 $x(t)$ 在不同的有限时间宽度内是平稳信号,从而计算出各个不同时刻的功率谱。与传统的傅里叶变换相比,短时傅里叶变换克服了全局性变化的局限性,能展示出信号频率成分的变化特征<sup>[23]</sup>。

本实验选取高斯窗,由于高斯函数的傅里叶变换仍然是高斯函数,且在 Heisenberg 不确定原理下有着最小的时宽带宽积,有利于时间、频率分辨率同时获得最佳效果<sup>[24]</sup>。窗口的长度尤为重要,本实验的高斯窗窗口长为128,采用短时傅里叶变换处理实验信号获得的时频图,如图5所示。

3 实验结果分析

3.1 泥石流声波最大振幅与流量之间的关系

流量是影响泥石流声波信号最大振幅的一个重

表 2 实验结果统计表

Tab.2 The statistics of experiment data

容重/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泥位/cm	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	振幅/Pa	Band1 振幅/Pa	Band2 振幅/Pa	Band3 振幅/Pa
1.3	2.15	7.1	0.03033	0.4780	0.1745	0.1457	0.1455
1.3	2.8	6.3	0.03518	0.7656	0.2225	0.2444	0.2914
1.3	3.0	5.9	0.03535	0.5638	0.1839	0.1902	0.1735
1.3	3.5	6.5	0.04550	0.7622	0.2686	0.2808	0.1936
1.3	3.46	8.3	0.05744	0.9358	0.2675	0.2708	0.2649
1.3	3.95	7.8	0.06126	1.1004	0.3524	0.3399	0.3831
均值	<b>3.14</b>	<b>6.98</b>	<b>0.04420</b>	<b>0.7676</b>	<b>0.2449</b>	<b>0.2453</b>	<b>0.2420</b>
方差	<b>0.40</b>	<b>0.85</b>	<b>0.00016</b>	<b>0.5289</b>	<b>0.0043</b>	<b>0.0047</b>	<b>0.0078</b>
1.5	1.97	5.3	0.02085	0.4850	0.1811	0.1466	0.1447
1.5	2.45	6.0	0.02940	0.7080	0.2052	0.1916	0.3002
1.5	2.75	5.6	0.03080	0.7432	0.3580	0.1328	0.2459
1.5	2.68	5.8	0.03109	0.7768	0.3134	0.2025	0.2373
1.5	3.13	6.6	0.04153	0.8094	0.3091	0.2764	0.2138
1.5	2.75	6.1	0.03330	0.8256	0.1967	0.2425	0.3674
1.5	2.84	6.5	0.03692	0.8516	0.3580	0.2607	0.2079
1.5	3.16	6.8	0.04280	0.9136	0.2955	0.3530	0.2447
1.5	3.06	7.1	0.04323	1.1000	0.2871	0.4049	0.3769
1.5	3.75	9.3	0.06995	1.3522	0.4593	0.3316	0.5260
均值	<b>2.85</b>	<b>6.51</b>	<b>0.03798</b>	<b>0.8565</b>	<b>0.2963</b>	<b>0.2543</b>	<b>0.2864</b>
方差	<b>0.22</b>	<b>1.27</b>	<b>0.00017</b>	<b>0.0545</b>	<b>0.0073</b>	<b>0.0080</b>	<b>0.0121</b>
1.7	1.75	4.5	0.0159	0.3478	0.1586	0.0887	0.0935
1.7	1.7	6.9	0.0234	0.4502	0.1415	0.1105	0.1937
1.7	2.06	5.6	0.0231	0.4556	0.1677	0.1515	0.1273
1.7	1.44	4.1	0.0117	0.4852	0.1909	0.1419	0.1420
1.7	2.6	5.4	0.0278	0.6992	0.2748	0.1797	0.2110
1.7	2.35	5.6	0.0262	0.7132	0.2926	0.2066	0.2013
1.7	2.1	4.6	0.0193	0.7274	0.2760	0.1595	0.2657
1.7	2.75	6.7	0.0371	1.0596	0.2769	0.3991	0.3519
1.7	3.06	5.4	0.0333	1.2252	0.3748	0.3171	0.5199
1.7	2.78	8.1	0.0450	1.4988	0.4202	0.5255	0.5214
1.7	3.01	10.6	0.0634	1.6958	0.3590	0.6633	0.6314
均值	<b>2.32</b>	<b>6.13</b>	<b>0.0296</b>	<b>0.8507</b>	<b>0.2666</b>	<b>0.2267</b>	<b>0.2962</b>
方差	<b>0.31</b>	<b>3.55</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.2078</b>	<b>0.0087</b>	<b>0.0351</b>	<b>0.0337</b>
2.0	0.23	5.9	0.0027	0.5256	0.1865	0.1668	0.1647
2.0	0.26	4.3	0.0023	0.5712	0.2027	0.1812	0.1790
2.0	0.91	4.3	0.0079	0.6178	0.1988	0.1603	0.2456
2.0	0.83	4.5	0.0074	0.6980	0.2209	0.2050	0.2570
2.0	1.27	4.4	0.0112	0.8074	0.2890	0.2542	0.2499
2.0	0.76	10.2	0.0155	1.1160	0.3519	0.3928	0.3415
2.0	1.30	6.9	0.0178	1.3746	0.4620	0.4797	0.3662
均值	<b>0.79</b>	<b>5.78</b>	<b>0.0092</b>	<b>0.8158</b>	<b>0.2731</b>	<b>0.2628</b>	<b>0.2577</b>
方差	<b>0.18</b>	<b>4.78</b>	<b>0.00003</b>	<b>0.0999</b>	<b>0.0105</b>	<b>0.0156</b>	<b>0.0056</b>

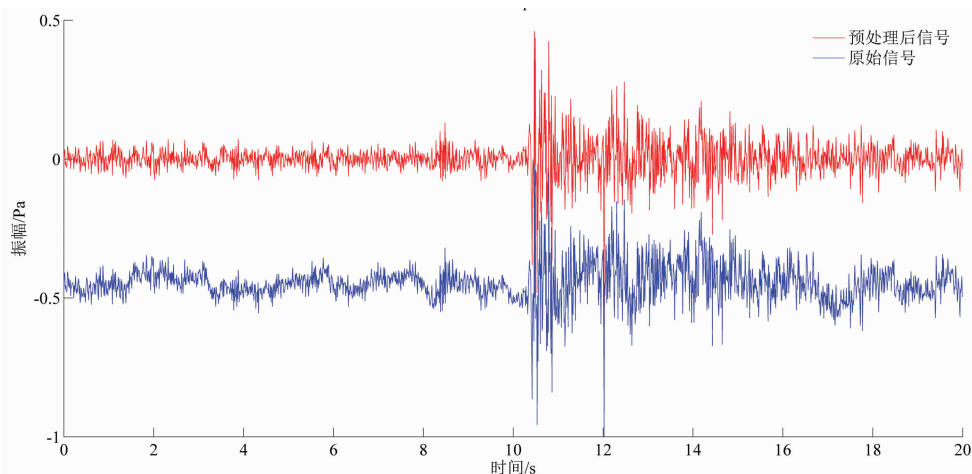


图3 泥石流声波信号预处理时域图

Fig. 3 The time domain of preprocessed acoustic signal

要因素。根据实验设计,以容重对实验结果进行分组,计算各组实验的流量以及泥石流声波信号的最大振幅,并对流量与声波最大振幅进行拟合,其结果如图4所示。

由图4可见,随着流量的增加,各容重组的实验声波最大振幅均逐渐增加,呈现出较好的线性关系;但各容重的流量-最大振幅关系有所不同,随容重增加,斜率基本呈现增长趋势。在流量相同的情况下,容重越大,最大振幅越大,容重对最大振幅影响明显。分析认为,随着流量的增加,泥石流内部颗粒相互之间作用加强,使得声波最大振幅增加。在泥石流体积不变情况下,粘性泥石流具有较大重力势能,但其动能因粘性颗粒的增加而较小,则更多的能量以摩擦的形式转化为热能和声能,故泥石流声波最大振幅与容重呈正相关性。

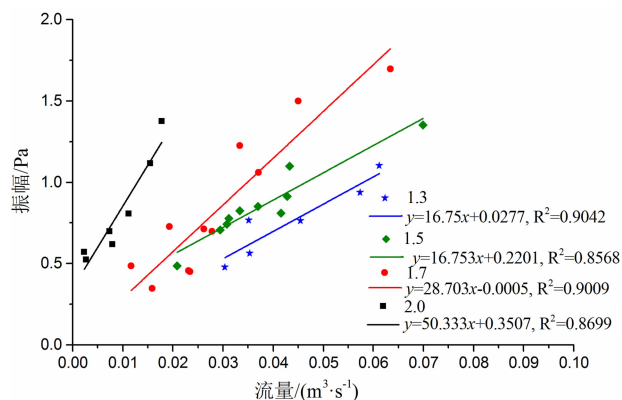


图4 流量-最大振幅关系

Fig. 4 Correlation between discharge and peak amplitude of debris flow

### 3.2 声波能量、频带与泥石流容重的关系

本实验通过声波采集系统和摄像机确定泥石流声波信号经过声波传感器的时刻,并选取该时刻前后10 s的声波,得到时长约20 s的声波信号,以避免背景噪音和流体撞击尾料箱对泥石流声波信号的影响。采用MATLAB软件的tfstft函数对声波信号进行短时傅里叶变换(STFT)并得到频谱图,如图5所示。

由图5可见:不同容重的泥石流声波信号(红框内)时长各不相同,随着泥石流容重的增加,时长也在增加,二者呈正相关性。分析认为粘性泥石流较稀性泥石流含有更多的细颗粒物,浆体的黏度更大,对固体颗粒粘滞作用更强,往往呈现整体运动,其流速小于稀性泥石流,使得从物料箱释放获得的动能较小,故随着泥石流容重的增加,声波信号的时长也增加。

不同容重泥石流的声波能量分布频带各不相同。容重 $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 的声波信号在Band1、Band2和Band3等3个频带都有较强的能量,能量分布较均匀,最大能量出现在中间频带;容重 $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 的信号在Band1和Band3频带有较强的能量,能量分布较均匀,最大能量出现在低频带;容重 $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 的信号在Band2和Band3频带有较强的能量,能量分布不均匀,最大能量集中在中高频;容重 $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 的信号在Band1和Band3频带有较强的能量,能量分布较均匀,最大能量出现在低频。分析认为随着泥石流容重增加,浆体浓度导致泥石流在运动过程中的屈服应力和黏性应力增加,导致泥石流的能量



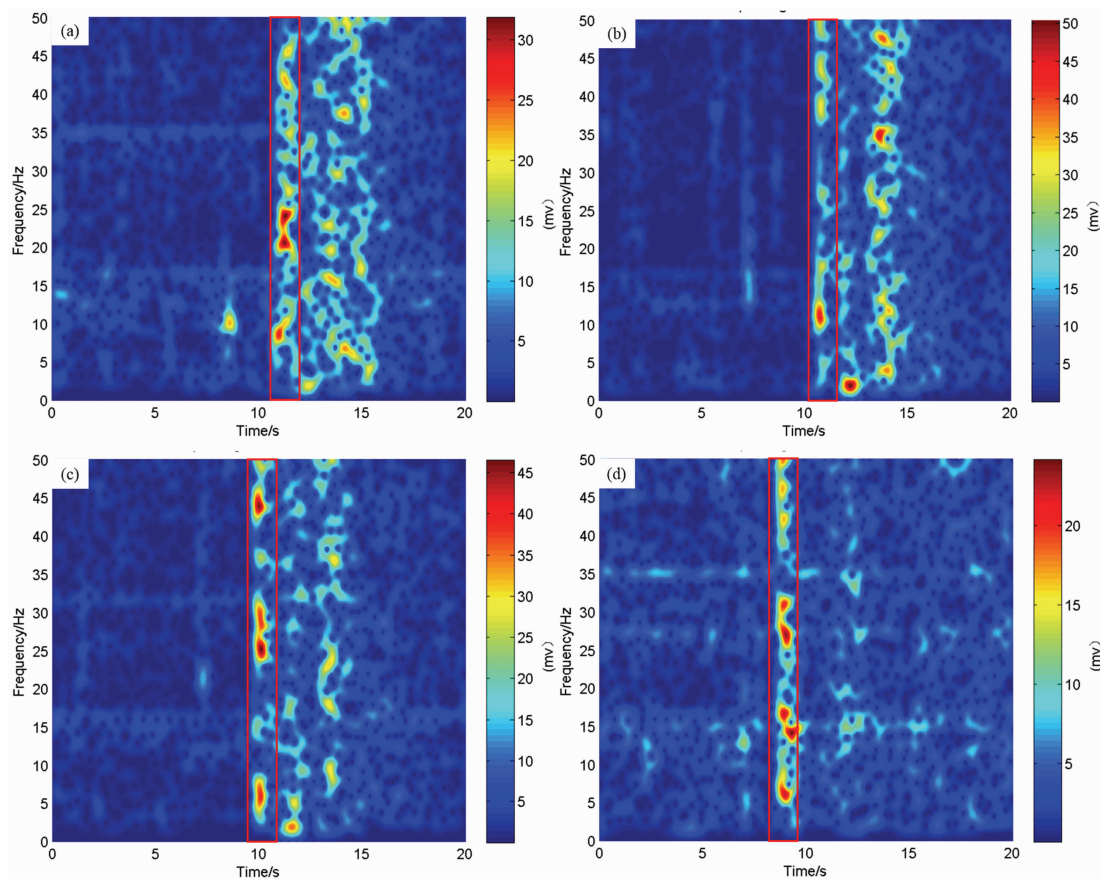


图5 实验信号的时频图(红色框中为泥石流的声波信号):

(a)  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (b)  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (c)  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (d)  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

Fig. 5 Time-frequency spectrogram of experimental signal (acoustic signal of debris flow in red box)

(a)  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (b)  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (c)  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (d)  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

损失增加。泥石流颗粒之间以及和沟床之间的作用方式从起初激烈的碰撞、摩擦作用逐渐变成以摩擦作用为主,外在表现为泥石流流体流速减小,流体呈“整体”运动。故随着泥石流容重增加,泥石流声波信号的频率趋于中、低频。

### 3.3 各频带振幅与流量之间的关系

由前述泥石流容重对声波能量分布的关系,参考 Kogelnig A 等<sup>[11]</sup>的频带划分方法。取各频带信号的最大振幅,研究流量和各频带最大振幅的关系,揭示能量分布的变化特征,如图6所示。

由图6可见,不同容重泥石流能量分布和各频带能量增长趋势各不相同:容重  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的声波信号在三个频带的振幅增长趋势相当,各频带振幅大致相同;容重  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的声波数据离散度较大,但 Band3 增长趋势略高于 Band1 和 Band2;容重  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的声波信号 Band1 增长趋势明显低于 Band2 和 Band3,能量表现出往中高频集中的特点;

容重  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的声波信号 Band3 增长趋势低于 Band1 和 Band2,能量表现出往中低频集中的特点。

容重  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的稀性泥石流,性质上更接近于洪水,其能量分布在三个频带上均匀分布,与 Kogelnig A 等<sup>[11]</sup>在阿尔卑斯山地区观测到的洪水的声波能量分布特征基本一致;容重  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的过渡型泥石流,容重较高,紊流强烈,涡流的产生与湮灭时间很短,颗粒之间、颗粒与槽壁槽底之间碰撞的距离变短,碰撞发生的间隔时间变短,使得中高频部分的能量增强;容重  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的粘性泥石流,大量粘粒的存在改变了浆体性质,使得流体更均一,颗粒之间作用受到浆体的阻尼而减弱,呈现整体运动,主要的作用形式——粘滞作用与摩擦作用,作用周期均较长,对应于低频成分,其能量集中分布于中、低频部分。

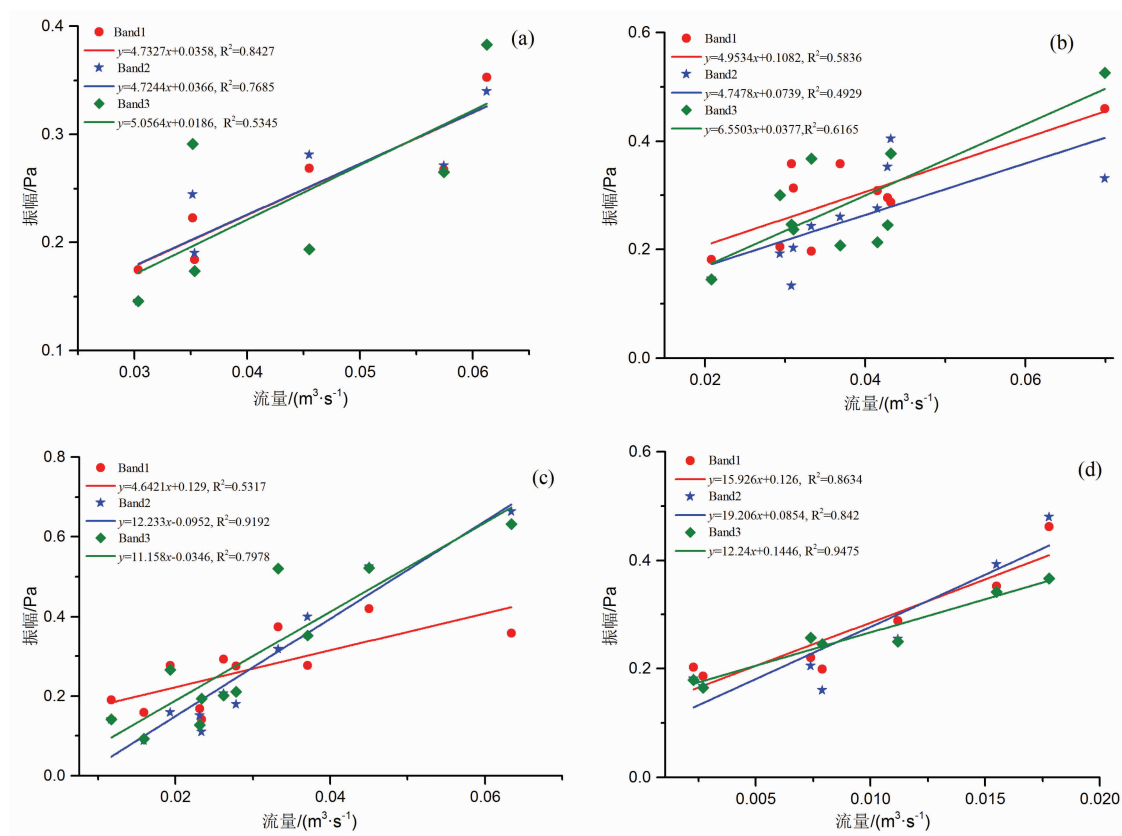


图6 不同容重泥石流各频带流量-振幅关系:(a)  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (b)  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (c)  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (d)  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

Fig. 6 Relationship between discharge and amplitude of bands in different densities

(a)  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (b)  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (c)  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ; (d)  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

## 4 结论与讨论

通过室内泥石流模拟实验获得不同容重泥石流的34组声波信号,结合短时傅里叶变换对信号进行时频分析,初步揭示了泥石流性质和规模对声波特征的影响规律。实验发现:

(1)无论是稀性、过渡性和粘性泥石流,其声波最大振幅均随着流量的增加而增高,二者具呈明显的线性关系:

$$\gamma = 1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}; y = 16.75x + 0.0277$$

$$\gamma = 1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}; y = 16.753x + 0.2201$$

$$\gamma = 1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}; y = 28.703x - 0.0005$$

$$\gamma = 2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}; y = 50.3333x + 0.3507$$

(2)声波振幅的高低可反映泥石流规模的大小,通过采集的声波峰值振幅,建立最大振幅与流量线性关系式,可以估算泥石流的峰值流量及规模,预测其危害大小。

(3)泥石流的容重即性质对峰值振幅影响明

显,随着容重的增加,斜率基本呈现增长趋势,由容重  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的  $y = 16.75x + 0.0277$  演变为  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的  $y = 50.333x + 0.3507$ ;在流量相同的情况下,容重越大,峰值振幅也越大。

(4)泥石流容重和泥石流流体通过声波传感器的时间成正相关性。容重  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的稀性泥石流的声波能量均匀分布在高、中、低等三个频带上;容重  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的过渡性泥石流的声波能量集中在中、高两个频带上;容重  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  的粘性泥石流的声波能量集中在中、低两个频带上。通过对声波能量分布的分析,可以对泥石流的性质和类型进行判别。

(5)实验是在室内进行的,受实验条件、实验仪器、数据测量的手段限制,泥石流规模较小,流程短,声波干扰因素较多,难以进行更大流量的泥石流实验,泥石流的配比也存在一定问题。因此,本实验所建立的一些关系式只是声波时频与泥石流容重、流量规律的反映,距离在警报中的实际应用尚有巨大差距。这一方面有待于今后在室内实验中针对性的

开展规模较大的泥石流模拟实验,以揭示声波产生机理和声波时频特征;同时,加强野外泥石流声波和运动要素的对照监测,获取有效的第一手声波数据,与室内实验相结合,进一步构建声波时频与泥石流类型、性质和运动要素的定量关系,在泥石流报警实践中不断验证和修改完善,为声波定量预警泥石流提供科学依据。

## 参考文献 (References)

- [1] 秦飞,郑菲,李均之. 孕震过程中次声波的产生机理[J]. 北京工业大学学报,2006,32(6):568-572 [QIN Fei, ZHENG Fei, LI Junzhi, et al. A Mechanism model for infrasound emission during earthquake incubation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(6):568-572]
- [2] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京:科学出版社,2005:5-10 [MA Dayou. Theoretical Basis of modern acoustic[M]. Beijing: China Science Publishing, 2005:5-10]
- [3] 张金山,崔鹏. 泥石流预警及其实施方法[J]. 水利学报,2012,43(s2):174-180 [ZHANG Jinshan, CUI Peng. Research on and implementation of debris-flow forecast and warning[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(s2):174-180]
- [4] 钟敦伦,张金山,谢洪,等. 泥石流警报技术探索[J]. 山地学报,2011,29(2):234-242 [ZHONG Dunlun, ZHANG Jinshan, XIE Hong, et al. Techniques of debris flow alarm[J]. Mountain Research, 2011, 29(2):234-242]
- [5] 章书成,余南阳. 泥石流次声波警报器 DFW—I Ⅲ 型简介[J]. 山地学报,2008,(4):382 [ZHANG Shucheng, YU Nanyang. Debris flow infrasound alarm DFW-I Ⅲ type profile [J]. Mountain Research, 2008, (4):382]
- [6] 刘敦龙. 基于次声监测的泥石流定位与实时监控方法[D]. 北京:中国科学院大学,2015:43-54 [LIU Dunlong. Debris flow positioning and real-time monitoring based on infrasound monitoring [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015:43-54]
- [7] 章书成,余南阳. 泥石流早期警报系统[J]. 山地学报,2010,28(3):379-384 [ZHANG Shucheng, YU Nanyang. Early warning system to debris flow [J]. Mountain Research, 2010, 28(3):379-384]
- [8] ZHANG Shucheng. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China[J]. Natural Hazards, 1993, 7(1):1-23
- [9] CHOU Hsienter, CHANG Yulung, ZHANG Shucheng. Acoustic signals and geophone response induced by stony-type debris flows [J]. Journal of The Chinese Institute of Engineers, 2013, 36(3):335-347
- [10] 周铭. 不同形态泥石流地声与次声特性比较研究[D]. 南宁:广西大学,2014:124-128 [ZHOU Ming. Research on the characteristic of ground vibrations and infrasound produced by different types of debris flows[D]. Nanning: Guangxi University, 2014:124-128]
- [11] KOGELNIG A, HÜBL J, SURINACH E, et al. Infrasound produced by debris flow: propagation and frequency content evolution[J]. Natural Hazards, 2014, 70(3):1713-1733
- [12] SCHIMMEL A, HÜBL J. Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals[J]. Landslides, 2015, 13(5):1181-1196
- [13] 何德伟. 泥石流次声特性及在警报中的应用[D]. 成都:中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,2008:45 [HE Dewei. Infrasonic characteristics of the debris flow and The application of the warning [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2008:45]
- [14] 李朝安,胡卸文,王良玮. 山区铁路沿线泥石流次声监测预警方法[J]. 声学技术,2012,31(4):351-356 [LI Chaoan, HU Xiewen, WANG Liangwei. Infrasound monitoring and early warning of debris flow along montanic railway line[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4):351-356]
- [15] LENG Xiaopeng, LIU Dunlong, WEI Fangqiang, et al. Debris flows monitoring and localization using infrasonic signals [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(7):1279-1291
- [16] LIU Dunlong, LENG Xiaopeng, WEI Fangqiang, et al. Visualized localization and tracking of debris flow movement based on infrasound monitoring[J]. Landslides, 2018, 15(5):879-893
- [17] 周继发. 泥石流次声监测软硬件系统[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016:66 [ZHOU Jifa. The software and hardware system of mudslides infrasound monitoring [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016:66]
- [18] 魏高荣. 泥石流次声监测预警系统设计[D]. 北京:中国地质大学(北京),2017:71-72 [WEI Gaorong. Design of mudslides infrasound monitoring and early warning system [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017:71-72]
- [19] 崔文杰. 基于次声的泥石流监测系统设计与分析[D]. 青岛:山东科技大学,2017:58-59 [CUI Wenjie. Design and analysis of debris flow monitoring system based on infrasound method [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017:58-59]
- [20] 王济. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:69-82 [WANG Ji. The application of MATLAB in vibration signal processing[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006:69-82]
- [21] 裴益轩,郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报,2001,(1):21-23 [PEI Yixuan, GUO Min, The fundamental principle and application of sliding average method [J]. Gun Launch & Control Journal, 2001,(1):21-23]
- [22] 许文杰,官洪运,邬晓琳. 泥石流次声信号时频分析方法的应用研究[J]. 计算机与现代化,2013,1(4):36-39 [XU Wenjie, GUAN Hongyun, WU Xiaolin. Analysis of debris flow infrasound signal based on time-frequency analysis methods[J]. Computer & Modernization, 2013, 1(4):36-39]



- [23] 胡雨豪,袁路,马东涛,等. 泥石流次声警报研究进展[J]. 地球科学进展,2018,33(6):606–613 [HU Yuhao, YUAN Lu, MA Dongtao, et al. Research progress on debris flow infrasound warning[J]. Advances in Earth Science, 2018,33(6):606–613]
- [24] 廖传军,李学军,刘德顺. STFT在AE信号特征提取中的应用[J]. 仪器仪表学报,2008,29(9):1862–1867 [LIAO Chuanjun, LI Xuejun, LIU Deshun. Application of STFT in feature extraction of acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(9):1862–1867]

## Experimental Study on the Influence of Debris Flow Properties and Scale on Acoustic Characteristics

YUAN Lu<sup>1,2</sup>, HU Yuhao<sup>4</sup>, MA Dongtao<sup>1,3,\*</sup>, LI Mei<sup>5</sup>

(1. Institution of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

4. CCTEG Chongqing Engineering Co. Ltd, Chongqing 400016, China;

5. China University Of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The acoustic wave of debris flow serves as an important indicator for debris flow early warning, because it conveys reliable information of the property and the scale of a moving debris flow. In this study, 34 debris flow experiments were designed with combination of the varied density of  $1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $1.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  and different volume discharge (scale) to collect the data of velocity, discharge (scale) and acoustic signal for analysis. It used the short-time Fourier transform (STFT) and filters to process acoustic signals and the quantitative relationship between peak amplitude and discharge, the distribution of acoustic energy were studied. Results showed that the peak amplitude of debris flow acoustic wave had a linearly positive correlation with its discharge. Peak amplitude increased linearly with the density, and fitting coefficient was linearly and positively correlated to density. The acoustic energy of debris flow varied with different bulk density. The acoustic energy of dilute debris flow was distributed evenly in three frequency bands: high frequency band (Band 3), middle frequency band (Band 2) and low frequency band (Band 1). The transitional debris flow behaved mainly in the middle and high frequency bands, whereas viscous debris flow presented in the middle and low frequency bands. The comprehensive understandings of debris flow acoustic characteristics by experiments would provide an insight into the early warning of debris flow for its type, scale and energy potential.

**Key words:** debris flow; property; discharge; acoustic wave; amplitude; frequencies