

DOI: 10.11779/CJGE202010023

基于广义 S 变换的不同类型泥石流声波试验研究

胡至华^{1, 2}, 胡雨豪³, 马东涛^{*1}, 袁路⁴, 李梅⁵

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016; 4. 成都城投建设集团有限公司, 四川 成都 610037; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:开展稀性、过渡性、黏性泥石流等 3 类泥石流声波模型试验后, 通过引入窗函数参数, 提出一种广义 S 变换, 分析不同类型泥石流声波信号的时频特征, 针对传统傅立叶变换的不足, 运用小波包变换方法, 提取声波信号的频带能量分布特征。研究表明: ①相比传统的时频分析手段, 广义 S 变换具有优良的时频聚焦性和分辨率; ②随着泥石流重度的增加, 泥石流峰值频率向低频移动; ③经小波包变换可将信号分解为 8 个频段 (0~6.25, 6.25~12.5, 12.5~18.75, 18.75~25, 25~31.25, 31.25~37.5, 37.5~43.75, 43.75~50 Hz), 稀性泥石流主要分布在 S6-8, 过渡性和黏性泥石流能量集中于 S2-4 内; ④基于声波信号频率区间和频带能量可综合识别不同类型泥石流。

关键词:泥石流类型; 声波信号; 广义 S 变换; 小波包变换; 频带能量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)10-1962-07

作者简介:胡至华(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事山地灾害防治工程与监测预警方面的工作。E-mail: zhihua6971@163.com。

Experimental study on acoustic waves of different types of debris flow using generalized S transform

HU Zhi-hua^{1, 2}, HU Yu-hao³, MA Dong-tao¹, YUAN Lu⁴, LI Mei⁵

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing 400016, China; 4. Construction Investment and Management Co., Ltd., CDCI, Chengdu 610037, China; 5. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The physical model tests in laboratory for debris flow with three types of sub-viscous, intermediate and viscous debris flows are performed. By introducing the window function parameters, a generalized S transform is proposed to analyze the time-frequency characteristics for acoustic signals of different types of debris flows. At the same time, in view of the shortcomings of the traditional Fourier transform, a wavelet packet transform method is used to extract the distribution characteristics of frequency band energy of the acoustic signals. The results show that: (1) Compared with the traditional time-frequency analysis methods, the generalized S transform has excellent time-frequency focus and resolution. (2) With the increase of the bulk density of debris flow, the peak frequency of debris flow moves to low frequency. (3) The signals are decomposed into 8 frequency bands (0 ~ 6.25, 6.25 ~ 12.5, 12.5 ~ 18.75, 18.75 ~ 25, 25 ~ 31.25, 31.25 ~ 37.5, 37.5 ~ 43.75, 43.75 ~ 50 Hz) by using the wavelet packet transform, the sub-viscous debris flow is mainly distributed in S6-8, and the intermediate and viscous debris flows are concentrated in S2-4. (4) Comprehensive identification of different types of debris flows can be realized based on the frequency range and frequency band energy of acoustic signals.

Key words: debris flow type; acoustic wave; generalized S transform; wavelet packet transformation; frequency band energy

0 引言

20 世纪以来, 人们发现在地震、火山、雪崩、滑坡、崩塌、泥石流等极端自然灾害事件中都会辐射不同类型的次声波。不同的现象和事件都会产生不同特征的次声信号量, 一切物体的摩擦、振动、碰撞都会产生次声。次声波是一种低于人耳听觉范围 (即低于

20 Hz) 的声波记录, 频率范围 0.01~20 Hz, 在标准温度和压力情况下, 在大气中的传播速度和声波一样, 均为 344 m/s。次声波在大气中能传播很长的距离, 几

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41572347)

收稿日期: 2020-01-08

*通信作者 (E-mail: dtma@imde.ac.cn)

乎不衰减, 这是由于大气对声波的选择性吸收——高频 ($>20\text{ Hz}$) 比低频更容易吸收^[1]。即使遇到高山等阻挡也可绕过, 适合于远距离观测。基于次声的特点, 若通过仪器采集到泥石流形成或运动时产生的次声信号, 则可发出预警, 如何有效的识别次声信号是灾害监测预警的重要环节。

时频分析是泥石流次声信号处理的关键, 它可以将次声信号从一维状态拓展到二维, 能更方便、直观地研究次声信号在时域与频域的变化。目前, 针对次声信号主要采用小波变换 (wavelet transform, CWT)、希尔伯特黄变换 (hilbert huang transform, HHT)、S 变换 (S transform, ST) 等方法^[2]。朱星等^[3]利用 STFT 和时域累计振铃技术法对岩石破裂次声信号进行了分析。康玉梅^[4]借助小波分析技术来提取时频能量, 实现了对声发射信号的时延估计。戴峰等^[5]采用 ST 变换对边坡微震信号进行了解析, 揭示了波形中的不同类型的震源破坏信息。张法全等^[6]将 ST 和时频重排相结合, 提出 RST (rearranged S transform, RST), 提高了信号的时频分辨率。

通过对泥石流流野外同步观测发现, 泥石流中的固体颗粒与沟道边界激烈碰撞会激发地震响应, 地震信号的每个峰值都对应着一次阵流^[7]。同时, 颗粒摩擦、碰撞后可在空气传播形成声波, 章书成等^[8]研究发现, 泥石流次声频率约 $5\sim 10\text{ Hz}$, 声压约 0.4 Pa 以上, 其声速比泥石流运动速度快 $30\sim 100$ 倍左右。国内外针对泥石流声波信号多侧重于时域或频域分析, 关于时频分析及信号识别研究尚不多见。

本文利用广义 S 变换与小波包分析技术相结合, 将研究对象从次声段拓展至可闻声, 对试验采集的泥石流声波信号进行分析研究, 通过提取不同性质泥石流声波信号的小波包频带, 进行对比分析。结合分析 2000 年东川天然泥石流声波信号, 对试验结果进行了验证。该研究丰富了泥石流预警预报理论, 对声波信号识别、监测和预警泥石流做出积极的探索。

1 试验概况

1.1 试验模型

本次模型试验在中国地质调查局成都探矿工艺研究所泥石流滑坡实验室完成。试验水槽长 600 cm , 槽宽 20 cm , 深 30 cm , 槽顶端设计一长方体形料斗, 尺寸为 $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}\times 120\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高), 下部设有开口闸门, 为便于泥石流能顺利从料斗中完全流出, 将水槽调至一定坡度。尾料池由木箱组成, 尺寸为 $120\text{ cm}\times 110\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)。在水槽中部设置 IDS2016 型声波采集系统, 主要由传感器 (ISD2016-C)、数字仪 (IDAS2016-A) 和显示器等组

成, 试验设计频率 100 Hz , 测量精度 50 mv/Pa (图 1)。

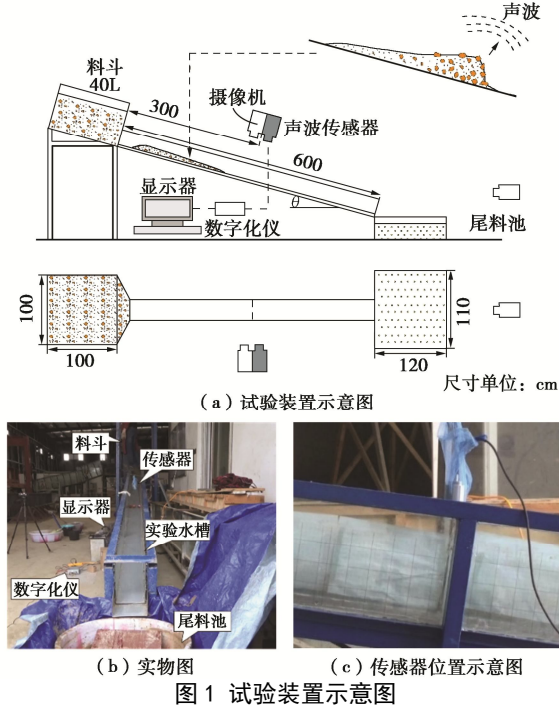


Fig. 1 Schematic of experiment setup

1.2 试验工况与设计

通过改变泥石流流体的重度, 测得不同性质泥石流流动所产生的声波信号。试验进行了密度为 $2.0, 1.7, 1.5, 1.3\text{ t/m}^3$ 从黏性到稀性的 3 类泥石流, 试验 65 组 (见表 1)。试验采集时在周围环境无干扰条件下, 声波采集仪收集一定时长的稳定信号后, 打开料斗闸门释放流体, 当泥石流流体完全流出水槽后, 再收集一定时长的背景信号, 以保证所采集的信号完整连续。

表 1 试验工况设计

Table 1 Design of experimental conditions					
流体性质	稀性		过渡性	黏性	
密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.3	1.5	1.7	1.9	2.0
试验组数	13	16	19	11	6

2 泥石流声波信号广义 S 变换

2.1 广义 S 变换及逆变换

S 变换是 1996 年由 Stockwell^[9]提出, 它是连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 和短时傅里叶变换的 (short time fourier transform, STFT) 的扩展。研究表明, S 变换克服了 CWT 所需要满足的小波变换容许性条件和零均值问题。S 变换是线性变换, 相比于 Wigner-Ville 分布与 Cohen 类双线性变换, 它克服了交叉项, 并且具有较高的时频分辨率。但是 S 变换中由于采用固定的高斯窗函数, 容易出现能量集中, 使其在应用中有所限制^[10]。Pinnergar 等^[11]提出双曲 S 变换, 通过改变窗口标准差和形状以取代高斯窗函数, 用于判定地震 P 波初至拾取。Moukadem 等^[12]提出了一种基于能量守恒和不等式约束来优化高斯窗

参数。李力等^[13]提出一种可调的非对称高斯窗函数并将其应用于煤岩层反射界面信号处理中。

S变换定义如下:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)w(\tau - t, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

窗函数 $w()$ 定义为固定的高斯窗函数:

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right) \quad (2)$$

$$\delta(f) = \frac{1}{|f|} \quad (3)$$

式中, f 为采样频率, t , τ 为时间, 其中 $\tau - t$ 为窗函数在时间轴上移动的位置, $\delta(f)$ 为尺度参数, 与 $|f|$ 有关, 它控制着窗函数的宽度。

S变换综合了 STFT 和 CWT 的优点, 窗函数是基于一个可移动、伸缩的高斯局部化窗口, 这使得可以根据频率或时间的变化自适应的调整窗口大小, 由式(2)可看出高斯窗在高频时有更好的时间分辨率, 在低频时有更佳的频率分辨率, 但根据海森堡(Heisenberg)测不准原理可知, 时频的尺寸不可能任意地同时取得极小, 时间窗和频率窗的有效宽度总是相互冲突的, 这也意味着可通过降低频域分辨率来提高时域分辨率, 或是降低时域分辨率以换取频域分辨率的提高^[13]。

由式(1)~(3)可看出, 窗函数的宽度固定, 为了使窗函数的调整更加灵活, 在窗函数的频率函数中引入两个新参数 a , b , $\delta(f)$ 变化如下:

$$\delta(f) = \frac{\sigma}{|f|} \quad (4)$$

式中, $\sigma = af + b$ ($a > 0$, $b \geq 0$), 式中 a 和 b 通过调节高斯窗函数的宽度, 以调节信号的时间和频率分辨率。当 $a=0$, $b=1$ 时, 广义 S 变换与原 S 变换相同。当 a 值增加, 信号中高频率段分辨率上升, 时间分辨率下降, 而 b 值增加则可提高低频成分的时间分辨率, 在实际应用中, 可不断调节 a , b 两个参数以达到最佳时频效果。

相对于原高斯窗函数中 $|f|$, 广义 S 变换变为 $|f|/af + b$, 通过引入参数 σ 来调节时窗宽度, 广义 S 变换定义如下:

$$MS(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)w(\tau - t, f, a, b)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

$w(\tau - t, f, a, b)$ 定义为广义 S 变换的窗函数:

$$w(\tau - t, f, a, b) = \frac{|f|}{(af + b)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2(af + b)^2}\right) \quad (6)$$

由式(5), (6)可得广义 S 变换:

$$MS(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \frac{|f|}{(af + b)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2(af + b)^2}\right) e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

S 变换是可逆的, 而且逆变换不会产生交叉项的干扰, 对式(5)进行傅立叶逆变换即可得广义 S 变换的原函数:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} MS(\tau, f) d\tau \right] e^{j2\pi ft} df \quad (8)$$

利用人工合成信号(图2)进行相关时频分析, 从图3的4种时频图可以看出, 从时频分辨率来分析, STFT 由于采用固定的窗函数, 使得其时频分辨率是固定不变的, 不能自适应调整, 虽然它能给出信号的联合时频特征, 但在高频段频率分辨率较低; 小波变换能量较弱, 在 20 Hz 频段识别较差, 高频段亦不能有效识别; 传统 S 变换能有效识别高、低频信号, 但“收敛程度”不够, 有较严重的交叉项, 影响信号有效判识, 为解决这一问题, 通过引入参数同时调节时域、频域分辨率来改进 S 变换^[13]。

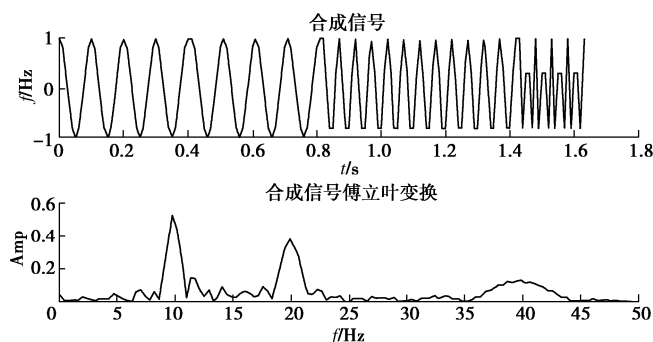
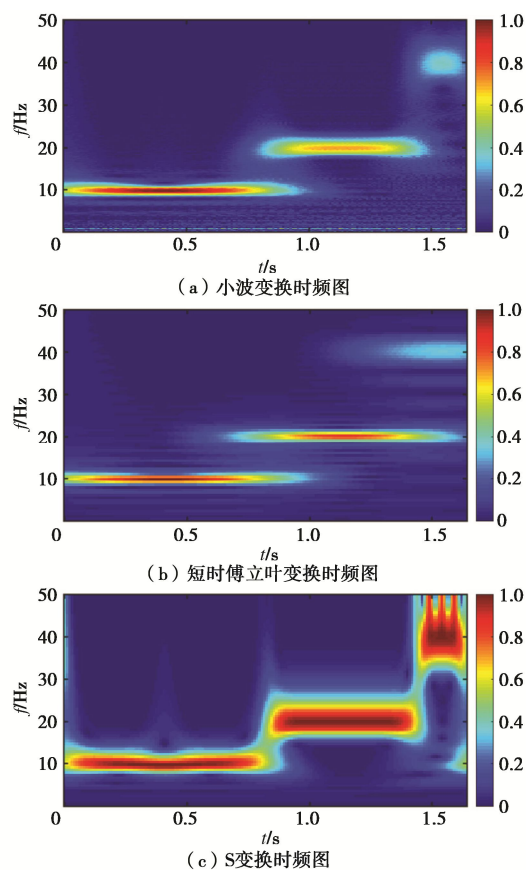


图2 人工合成信号

Fig. 2 Synthetic signal



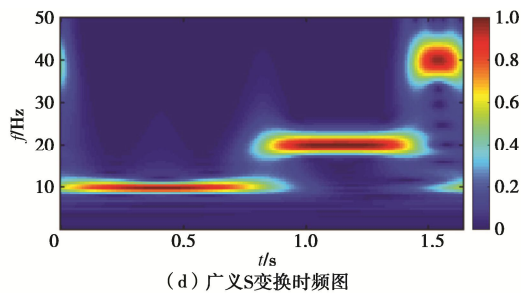


图 3 合成信号时频谱对比

Fig. 3 Comparison of time-frequency spectra of synthetic signals

2.2 小波包能量频带分析

泥石流声波信号属于非平稳、非线性信号, 传统的时域或频域分析无法了解信号真正的频率特征。通过小波包分解对声波信号进行频带分离, 计算各频带的能量比例, 即可反映各频带的能量变化规律^[14], 其计算原理如下:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} y^2(t) dt = \sum_{i=0}^N y_i^2(t) \Delta t \quad (9)$$

经小波包分解后, 各频带能量为

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} y_i^2(t) dt \quad (10)$$

由此可得不同频带信号的相对能量

$$P_i = E_i / E \quad (11)$$

式中, $y(t)$ 为原始信号, E 为原信号的总能量, y_i 为分解后各频带信号, E_i 为各频带信号的能量, P_i 为某频带的相对能量百分比。

3 广义 S 变换的时频特征及能量分布

3.1 声波有效信号提取

本次试验中, 因水槽长度较短, 泥石流流体运动速度较快, 为记录有效泥石流声波信号, 通过采集泥石流流出料斗时前后 10 s 的声波记录, 当泥石流流出水槽后, 流体内石块和泥浆与尾料池产生激烈碰撞、摩擦, 不可避免地产生了无效噪声, 由于有效声波信号和碰撞噪声频率特征各异, 本文采取单独提取泥石流声波有效信号, 经广义 S 逆变换重构新信号, 还原了真正的泥石流流体中的碰撞、摩擦信号。

图 4 为原信号经广义 S 变换后的时域图和时频图。从图 4 中可以看出, 整段采集信号主要分为 3 部分, 0~920 ms 为采集前的稳定背景噪音, 920~1320 ms 为试验采集过程中的声波信号, 1320~2000 ms 为采集后稳定的背景噪音。920~1320 ms 可再细分为 920~1020 ms 的泥石流运动发出的信号, 1200~1350 ms 为冲击尾料池产生的碰撞信号, 以及 1020~1200 ms 的过渡信号。实线框内为试验采集的有效泥石流声波信号, 采集时间约为 920~1020 ms, 主频带分布范围较广, 主要在 10~40 Hz, 峰值频率为 22 和 34 Hz。虚线框内为泥石流冲出水槽后, 与尾料池冲击产生的

碰撞信号, 采集时间约为 1200~1350 ms, 主频带分布范围较广, 主要在 20~45 Hz, 峰值频率为 24, 37, 44 Hz。由于泥石流流体与尾料池冲击时间较长, 仪器采集的信号持续时间相对较长, 峰值频率较单一且幅值高。从信号持续时间、主频带分布、峰值频率来看, 920~1320 ms 可以解耦出有效信号和碰撞信号, 二者特征差异明显, 可将 920~1020 ms 段信号单独提取, 经 S 逆变换后合成有效信号, 以揭示真正泥石流运动所产生的信号。

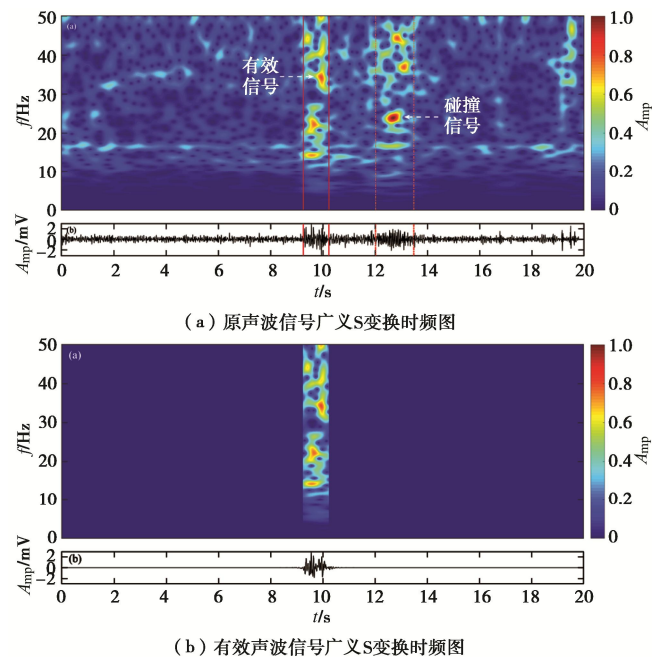


图 4 声波信号广义 S 变换时频分布

Fig. 4 Generalized S transform time-frequency distribution of acoustic signals

3.2 泥石流声波信号时频特征

利用广义 S 变换对不同类型泥石流进行时频分析。由 5 可以看出, 不同类型的泥石流声波信号的时频特征各异, 从总体趋势上来看, 随着泥石流重度的增加, 声波信号的主频向低频移动。从频带分布来看, 稀性泥石流分布在高频段, 主要在 30~50 Hz, 过渡性泥石流分布在中频段, 主要在 20~30 Hz, 黏性泥石流分散分布, 频率峰值在 20 Hz 以下。从持续时间来看, 稀性泥石流相比高重度的泥石流持续时间较短, 分析认为随着浆体浓度的增加, 泥石流流体在运动过程中所受的黏滞力和屈服应力也相应增加, 黏粒分散于颗粒间, 起着“润滑”的作用, 使得颗粒间的碰撞几率减小, 流速降低, 流体趋向于“整体运动”^[15]。

3.3 小波包频带能量分布特征

利用 db3 小波对采集到的样本信号进行 3 层小波包分解, 可将 0~50 Hz 的频率分解为 0~6.25 Hz, 6.25~12.5 Hz, ..., 43.75~50 Hz (分别对应于 S1~S8)。

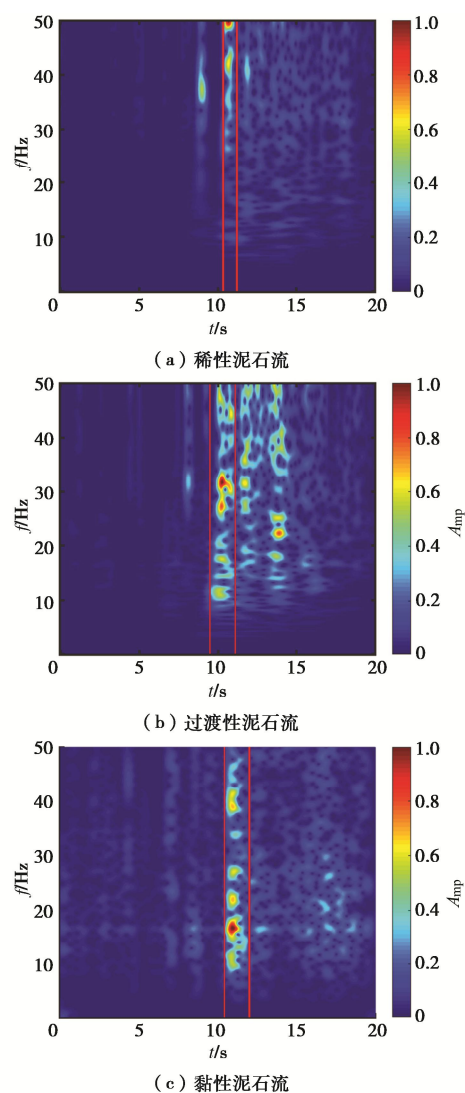


图5 典型泥石流声波信号时频分布

Fig. 5 Time-frequency distribution of acoustic signals for typical debris flows

由式(9)~(11)可分别求取稀性、过渡性、黏性泥石流的归一化频带能量分布。

从表2和图6可以看出,不同类型泥石流的小波包频带能量分布差异明显,低重度泥石流相比较高重度泥石流而言,主要分布在高频段(>30 Hz频段)。具体表现为:在高频段(S6-8),稀性泥石流能量分布集中,比例可达57.27%;而高重度的泥石流声波信号频带能量分布较低,在低频段(S2-S4),高重度的黏性、过渡性泥石流分布较高,分别可达49.42%和47.35%。同时,从能量分布最高频带来看,稀性泥石流分布在S6频带,过渡性和黏性泥石流分布在S4频带。以上分析表明,不同类型泥石流小波包频带能量分布差异明显,总体趋势表现为:随着泥石流重度的增加,声波信号能量向低、中频移动。基于此,通过分析相关频带能量分布,设定相关阈值,可实现对不同重度泥石流声波信号进行有效识别。

表2 不同类型泥石流小波包频带能量及其分布
Table 2 Energy and distribution of wavelet packet frequency band for different debris flows

频带 序号	能量分布百分比/%		
	稀性	过渡性	黏性
S1	0.78	1.15	0.75
S2	8.50	16.99	9.89
S3	7.44	12.63	15.26
S4	9.35	17.73	24.27
S5	16.65	11.16	9.98
S6	24.78	8.36	15.46
S7	10.88	14.70	8.36
S8	21.61	17.29	16.03

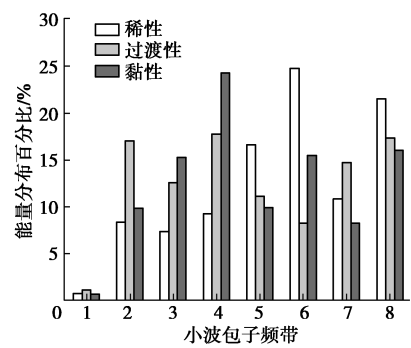


图6 不同类型泥石流频带能量分布

Fig. 6 Distribution of wavelet packet frequency band for different debris flows

4 实例验证

云南东川蒋家沟泥石流属于小江流域支流,该区域构造活动强烈,岩层破碎,地震活动频繁,加之流域暴雨频发,沿程崩塌、滑坡非常活跃,提供了大量的松散固体物源。蒋家沟以其暴发频率高、历时长、规模大、危害严重而独具代表性,被誉为“泥石流的天然博物馆”^[16]。

以2000年8月9日暴发的一次泥石流为例。根据康志成等^[17]的观测资料显示,该次泥石流发生于2000年8月9日18时05分,历时2 h 55 min。泥石流平均重度为2.16 N/m³,属于黏性泥石流。

基于频率区间和频带能量分布综合判识,从图7可看出,该段声波信号峰值频率主要集中于10~15 Hz。根据模拟试验不同类型泥石流声波频带分布可知,重度越高,泥石流声波峰值频率和频带能量越往低频移动,实际泥石流波形特征验证了试验结果。

从表3可知,该段黏性泥石流频带主要能量分布在S3~S4(7.5~15 Hz),其中,S3频带能量最高,

可达 35.73%，与试验结果基本一致。

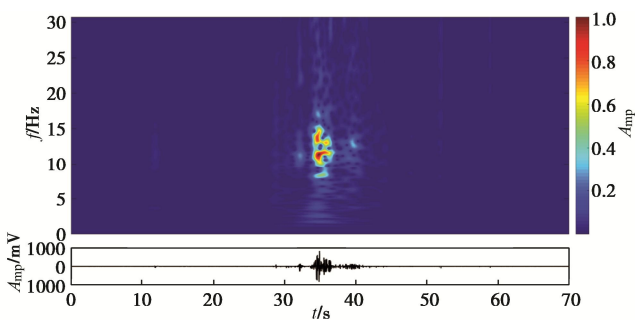


图 7 蒋家沟泥石流声波信号

Fig. 7 Acoustic signals of debris flow in Jiangjia gully

表 3 蒋家沟泥石流不同频带能量分布

Table 3 Energy distribution in different frequency bands of debris flow in Jiangjia gully

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
5.63	9.14	35.73	21.66	0.46	0.86	19.48	7.04

5 结 论

(1) 通过引入窗函数参数, 根据信号差异可以灵活地调节高斯窗函数的宽度, 提出的广义 S 变换改善了时频分布的分辨率, 相比传统的时频分析手段, 广义 S 变换具备优良的时频聚焦性和分辨率。

(2) 随着泥石流重度的增加, 其声波信号的峰值频率向低频移动。不同类型的泥石流声波信号频带能量分布差异明显, 稀性泥石流主要分布在 30 Hz 以上的较高频段, 过渡性和黏性泥石流分布在中低频段。

(3) 对 2000 年 8 月 9 日蒋家沟实测泥石流声波信号分析发现, 该段黏性泥石流声波信号峰值频率 10~15 Hz, 频带能量主要集中于 7.5~15 Hz。实测信号有效的验证了试验结果, 即随着泥石流重度的增加, 泥石流声波信号峰值频率、能量分布主要分布于中低频段。

本文通过分析不同重度下泥石流声波信号的波形及频带能量特征, 为探究不同类型泥石流声波性质差异做了积极探索。

参考文献:

[1] PILGER C, BITTNER M. Infrasound from tropospheric sources: impact on mesopause temperature?[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009, 71(8/9): 816 - 822.

[2] 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 Yu-hao, YUAN Lu, MA Dong-tao, et al. Research progress on debris

flow infrasound warning[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 606 - 613. (in Chinese))

[3] 朱 星, 许 强, 汤明高, 等. 典型岩石破裂产生次声波试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1306 - 1312. (ZHU Xing, XU Qiang, TANG Ming-gao, et al. Experimental study of infrasound wave generated by typical rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1306 - 1312. (in Chinese))

[4] 康玉梅, 朱万成, 白 泉, 等. 基于小波变换时频能量分析技术的岩石声发射信号时延估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1010 - 1016. (KANG Yu-mei, ZHU Wan-cheng, BAI Quan, et al. Time-delay estimation of emission signals of rock using time-frequency energy analysis based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1010 - 1016. (in Chinese))

[5] 戴 峰, 姜 鹏, 徐奴文, 等. 蓄水期坝肩岩质边坡微震活动性及其时频特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 359 - 370. (DAI Feng, JIANG Peng, XU Nu-wen, et al. Study of microseismicity and its time-frequency characteristics of abutment rock slope during impounding period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 359 - 370. (in Chinese))

[6] 张法全, 王海飞, 王国富, 等. 基于 RST-NMF 模型的微震信号时频分析和识别[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 1 - 7. (ZHANG Fa-quan, WANG Hai-fei, WANG Guo-fu, et al. Time-frequency analysis and identification for micro-seismic signals based on RST-NMF model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 1 - 7. (in Chinese))

[7] COVIELLO V, ARATTANO M, COMITI F, et al. Seismic characterization of debris flows: insights into energy radiation and implications for warning[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(6): 1440 - 1463.

[8] 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 Shu-cheng, YU Nan-yang. Early warning system to debris flow[J]. Mountain Research, 2010, 28(3):379 - 384. (in Chinese))

[9] STOCKWELL R G. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998 - 1001.

[10] 郑成龙, 王宝善. S 变换在地震资料处理中的应用及展望 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1580 - 1591. (ZHENG Cheng-long, WANG Bao-shan. Applications of strans form in

- seismic data processing[J]. Progress in Geophysics, 2015, **30**(4): 1580 - 1591. (in Chinese))
- [11] PINNEGAR C R, MANSINHA L. Time-local spectral analysis for non-stationary time series: The S-transform for noisy signals[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2003, **3**(3): L357 - L364.
- [12] MOUKADEM A, BOUGUILA Z, ABDESLAM D O, et al. A new optimized Stockwell transform applied on synthetic and real non-stationary signals[J]. Digital Signal Processing, 2015, **46**: 226 - 238.
- [13] 李 力, 魏 伟, 唐汝琪. 基于改进 S 变换的煤岩界面超声反射信号处理[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(11): 2579 - 2586. (LI Li, WEI Wei, TANG Ru-qi. Processing of ultrasonic reflection signal from coal-rock interface using modified S-transform[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(11): 2579 - 2586. (in Chinese))
- [14] 袁 路. 泥石流次声影响因素的实验研究[D]. 成都: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 2019. (YUAN Lu. Experimental Study on the Influence Factors of Infrasound From Debris Flow[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2019. (in Chinese))
- [15] 袁 路, 胡雨豪, 马东涛, 等. 泥石流性质和规模对声波特性影响的实验研究[J]. 山地学报, 2018, **36**(6): 889 - 897. (YUAN Lu, HU Yu-hao, MA Dong-tao, et al. Influences of debris flow property and scale on acoustic wave characteristics by experiment[J]. Journal of Mountain Research, 2018, **36**(6): 889 - 897. (in Chinese))
- [16] 丁明涛, 韦方强. 云南蒋家沟泥石流成因及其防治措施探析[J]. 水土保持研究, 2008(1): 20 - 22. (DING Ming-tao, WEI Fang-qiang. Research on the cause and countermeasures of debris flow hazard of Jiangjia Valley, Yunnan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008(1): 20 - 22. (in Chinese))
- [17] 康志成, 崔 鹏, 韦方强, 等. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集(1995—2000) [M]. 北京: 科学出版社, 2007. (KANG Zhi-cheng, CUI Peng, WEI Fang-qiang, et al. Data Collection of Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station Chinese Academy of Sciences (1995 — 2000)[M]. Beijing: China Science Publishing, 2007. (in Chinese))
-

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司