基于微震技术的河流过程监测及水文参数反演的初步探索

冯亮[1a,1b*]，张世哲[1a,2,3]，谢斌[4]，周晓悦[1a]，续伟[1a]，王艳梅[1a]

1. 江西理工大学 a. 资源与环境工程学院；b. 河流源头水生态保护江西省重点实验室，江西 赣州 341000；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所，成都 610041；
4. 江西省地震局赣州地震监测中心站，江西 赣州 341000

* 通信作者，E-mail：liang.feng@jxust.edu.cn

2024-06-03 收稿；2024-07-25 修回；2024-07-26 接受

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(4210071309)；江西省自然科学基金面上项目(20224BAB203040)；中国地震局“监测、预报、科研”三结合课题基金项目(3JH-202401050)；江西省地震局“2111”孵化基金项目(FD2111-202404)

中图分类号：X43；X84；TM93　　文章编号：2096-8523(2026)01-0236-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240293

摘　要：河流监测手段趋向遥感、智能化，传统河流监测技术费时费力，且在洪水期间面临仪器损坏和缺失数据的风险。国家地震台网分布广泛密集，微震技术具有远程无接触、低成本和 24 h 无间断监测的特点，正逐渐被用于河流监测中。通过野外河流微震监测试验，监测与分析河流过程的动态振动信号，获取河流湍流过程微震信号的物理特征。在此基础上，利用带通滤波的方法保留 2～7 Hz 频带的信号，采用 Welch 法计算出微震信号时频分析图上在 2～7 Hz 频带内 1 min 平均地震功率，将其转换为能量的形式，并与现场测得的河流水文数据相匹配，从而评估微震监测河流的潜力。为获取河流的水文参数，提出一个简单的线性回归模型量化平均功率谱密度(PSD)与河流湍流过程之间的关系，由此推导出反演计算河流流量的线性近似模型，模型反演结果在实测值附近波动，相对误差在 10.29% 以内，反演结果较为准确。本研究为野外河流微震监测试验的初步探索，研究成果可为依托国家高密度地震台站的河流洪水及常态水文遥感、智能化监测提供参考和理论依据。

关键词：微震监测；河流过程监测；时频分析；功率谱密度（PSD）；流量反演；水文参数反演

洪水，是一种常见的自然灾害，在夏秋两季频发，给人民的生产生活带来极大危害。作为对人类影响最广泛的自然灾害，据经济合作与发展组织的数据，每年全球因洪水灾害造成的经济损失超 400 亿美元，近几十年来因洪水而死亡的人数已增加至每年 100 多人。我国地域辽阔，洪水灾害频发，超过一半的国土面积存在着不同危害程度的洪水灾害，由洪水灾害造成的损失占全部自然灾害损失的 40% 以上[1-5]。据中华人民共和国水利部 2022 年公布的《中国水旱灾害防御公报》统计，2000−2022 年间受洪涝灾害影响，累积死亡人数达 21 235 人，累积直接经济损失达 39 959.93 亿。因此对河流进行监测，加强防洪预警，实现防洪减灾具有重大的实际意义[6]。

传统水文测量与监测需要建立水文站并布置测量仪器，过程较为繁琐，耗费人力物力，并且在洪水期间面临仪器损坏和缺失数据的风险[7-9]。近年来，越来越多的学者揭示了微震监测技术在河流水文监测与参数方面的潜力，如 GOVI 等[10] 第一次探索用微震方法监测冲积河道部署了 6 台短周期地震仪，分析了几次洪水事件的平均地震振幅，并强调了微震床荷监测的潜力。BURTIN 等[11] 通过对跨越喜马拉雅山脉的密集被动微震台网(Hi-CLIMB)记录的

著录信息：冯亮，张世哲，谢斌，等. 基于微震技术的河流过程监测及水文参数反演的初步探索 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：236-246.
FENG Liang, ZHANG Shizhe, XIE Bin, et al. Preliminary exploration of river process monitoring and hydrological parameter inversion based on microseismic technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 236-246.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

连续微震数据进行分析，发现高频环境地震能量存在强烈的时空变化，在 24 h 周期内地震能量与该地区降水和河流流量的日变化基本一致，指出了利用微震信号量化连续河床荷载和监测其空间变化的潜力。ROTH 等[12] 利用瑞士前阿尔卑斯山脉 Erlenbach 河的宽带（5 ~ 480 Hz）微震、河流流量、降水和推移质数据，提出了一个简单的、经验校正的线性近似模型，用于反演计算推移质输运率，预测结果与河道中校准地震检波器得出的输运率有相当好的相关性。ANTHONY 等[13] 发现近流地震仪在水平分量上记录的低频信号（0.1 ~ 2 Hz）对流量异常敏感，并在数天的暴雨过程中，利用流量来校准单个传感器的水平地震功率，证明低频信号可以用简单的回归来精准估计河流流量。COOK 等[14] 于 2021 年在《Science》期刊上发表利用区域地震台网对自然洪流灾害探测和监测预警的研究，表明了微震监测在河流洪水监测预警的实际应用的可能性，以及地震台网在未来地质灾害监测的应用潜力。

该技术成本低廉、可远程操控、仪器在洪水发生时不易损毁，并且能够 24 h 无间断监测[15-16]。本研究以江西省赣州市上犹县梅水乡园村九曲河为研究对象，通过野外试验研究，分析河流微震信号的物理特征，进而评估利用微震技术监测低流量河流的潜力[17]，构建一种利用微震信号反演河流流量的数学模型。

1　试验方案

1.1　试验场地

试验场地位于江西省赣州市上犹县梅水乡园村，该区域地形上属低山地带，海拔高度 200 ~ 300 m，其相对高度 50 ~ 100 m。出露地层为晚古生界的泥盆系、石炭系，岩性主要有石英质砾岩、石英砂岩、粉砂岩和白云质灰岩。

试验场地属亚热带季风湿润气候，降雨适中、气候温和、四季分明，其年平均气温为 18.3℃，冬季最低气温为 3℃，夏季最高气温为 39℃，年平均降雨量为 1 235.6 mm，一般每年的 3–9 月属雨季，雨季降雨量占年降雨量的 66%，同年 10 月至次年 2 月为旱季，旱季降雨量占年降雨量的 34%。在试验场地境内有 1 条较大的河流，其属于梅水河的 1 个支流，全长 17.3 km，流域面积 33.1 km^2，流经梅水乡联群村、上坪村、园村，受季节性影响，河流在旱季干涸，雨季有水。

1.2　试验仪器

试验采用意大利 SARA 电子仪器公司生产的三轴微震监测设备（S45 三轴速度计，图 1a）接收河流产生的振动信号，仪器的换能系数值是 78 V/m/s，仪器的自然频率为 4.5 Hz。微震设备的三轴方位分别为垂直方向 Z（数据记录为通道 Z）、东西方向 EW（数据记录为通道 E）和南北方向 NS（数据记录为通道 N），同时内置 GPS 以便实时定位授时，确保设备监测时的时间准确性。在试验过程中所有设备均以 200 Hz 的频率采样，并使用户外电源 12 V-60 A 电池为监测设备供电。试验时使用南京君灿仪器设备公司生产的 LS1206B 便携式流速流量仪（图 1b）测量河流流速，同时测量水位用以估计河流断面。



图 1　试验仪器

Fig. 1　Experimental instruments

1.3　试验设置

河流监测试验共有 4 处（图 2），使用微震监测设备 4 台，其中 1 台设备（SZ3）集三轴微震检波器和采集器为一体，另外 3 台设备为分离式，分别配备了 1 个 SARA24 位 A/D 采集器（SL06）。在进行监测之前，每台设备均按传感器上箭头所示找准 N 方向，并通过内置水准仪调平后部署于指定位置。台站部署为每次试验将 SZ3 部署在人类活动频繁的道路旁，其他设备传感器分别于河流中部署 1 台，河岸边部

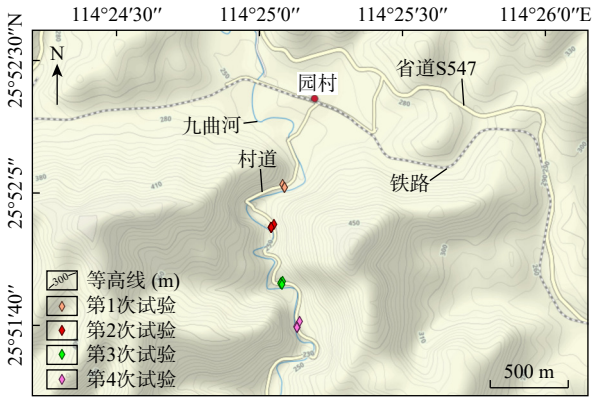


图 2　显示试验及台站位置的场地地形图

Fig. 2　Topographic map of the study area showing the locations of the experiments and stations

署 1 台，在离岸约 15 m 处部署 1 台用于场地环境噪音对比监测（第 4 次试验因场地限制并未放置）。

河流监测试验于 2024 年 3 月 17 日完成，共计完成 4 处微震监测试验（图 3）及 1 次流速连续监测试验（图 3c），每次试验时长为 20 min，其中流速连续测量的采集频率为 1 次/min。在每次试验前测量出河流的平均宽度，并利用便携式流速流量仪每隔一定距离测量出河流的水位以及流速，以便后续绘制河流断面图，从而计算出河流流量[18]。



图 3　河道仪器布设图（SZ2 等均为实验仪器编号）

Fig. 3　Layout of seismic instruments

2　数据与方法

2.1　流量数据

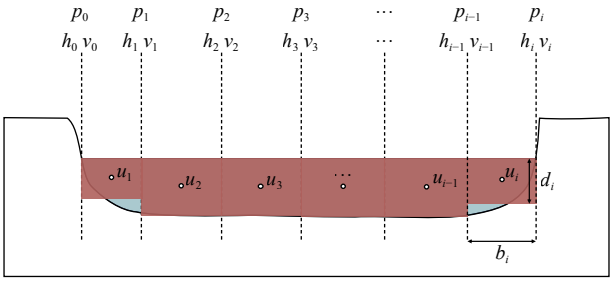
河流流量通常通过确定水流过被测横截面积的平均流速来估计，此外也可以通过测量装置等直接方法测量，还可以通过经验方程和数学模型等间接方法确定流量。本研究使用最常用的流量计算方法，即速度面积法[19]。该方法的计算原理是根据河流截断宽度将截面分成若干切片，然后根据每个切片的平均切片速度及其切片面积得到每个切片的流量，最后叠加即为河流流量。具体计算过程如下（计算示意图见图 4）。

首先计算切片宽度 b_i：

$$b_i = p_i p_0 - p_{i-1} p_0 , \tag{1}$$

式中：$p_i p_0$ 为第 i 个垂直测量点至河岸起点的距离；p_0 为河岸起点；p_i 为第 i 个测量点。

接着计算切片深度 d_i：



p_0. 河岸起点；p_i. 第 i 个测量点；$p_i p_0$. 测量点至河岸距离；h_i. 测量点 p_i 所测水位；v_i. 测量点 p_i 所测表面流速；u_i. 切片流速；d_i. 切片深度；b_i. 切片宽度

图 4　速度面积法估算河流流量示意图

Fig. 4　Schematic diagram of river discharge estimation by the velocity-area method

$$d_i = \frac{h_{i-1} + h_i}{2} , \tag{2}$$

式中：h_{i-1} 和 h_i 分别为第 i–1 个垂直测量点和第 i 个垂直测量点所测水位。

将式（1）结果与式（2）结果相乘，得到切片面积 A_i：

$$A_i = b_i d_i 。 \tag{3}$$

确定平均切片速度（平均垂直速度）的最常用方法有垂直速度曲线法、两点法和十分之六深度法。由于本试验只测得河流表面流速，并且研究河流属小流量溪流，因此对于平均切片速度的计算采用文献 [20] 提出的线性关系。得到平均切片流速 u_i：

$$u_i = 0.552 \overline{u}_{wsi} , \tag{4}$$

式中：$\overline{u}_{wsi}$ 为切片平均水面速度，其值为：

$$\overline{u}_{wsi} = \frac{v_{i-1} + v_i}{2} , \tag{5}$$

式中：v_{i-1} 和 v_i 分别为第 i–1 个垂直测量点和第 i 个垂直测量点所测表面流速。

结合式（3）和式（4）得到每个切片的片流量 q_i：

$$q_i = u_i A_i 。 \tag{6}$$

最终得到河流流量 Q：

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i , \tag{7}$$

式中：n 为切片数。

将 4 处试验所测剖面数据经上述计算过程处理得到第 1 ~ 4 次试验位置处河流流量分别为 0.444，0.611，0.512，0.598 m^3/s。

2.2　微震数据

本研究范围为河流过程在 1 Hz 以上频率范围内产生的地震波。基于 Python 编程将全部微震原始数据转换为地面速度信号，并过滤掉 1 Hz 以下的地震波，得到信号的波形，图 5 展示了不同断面位置

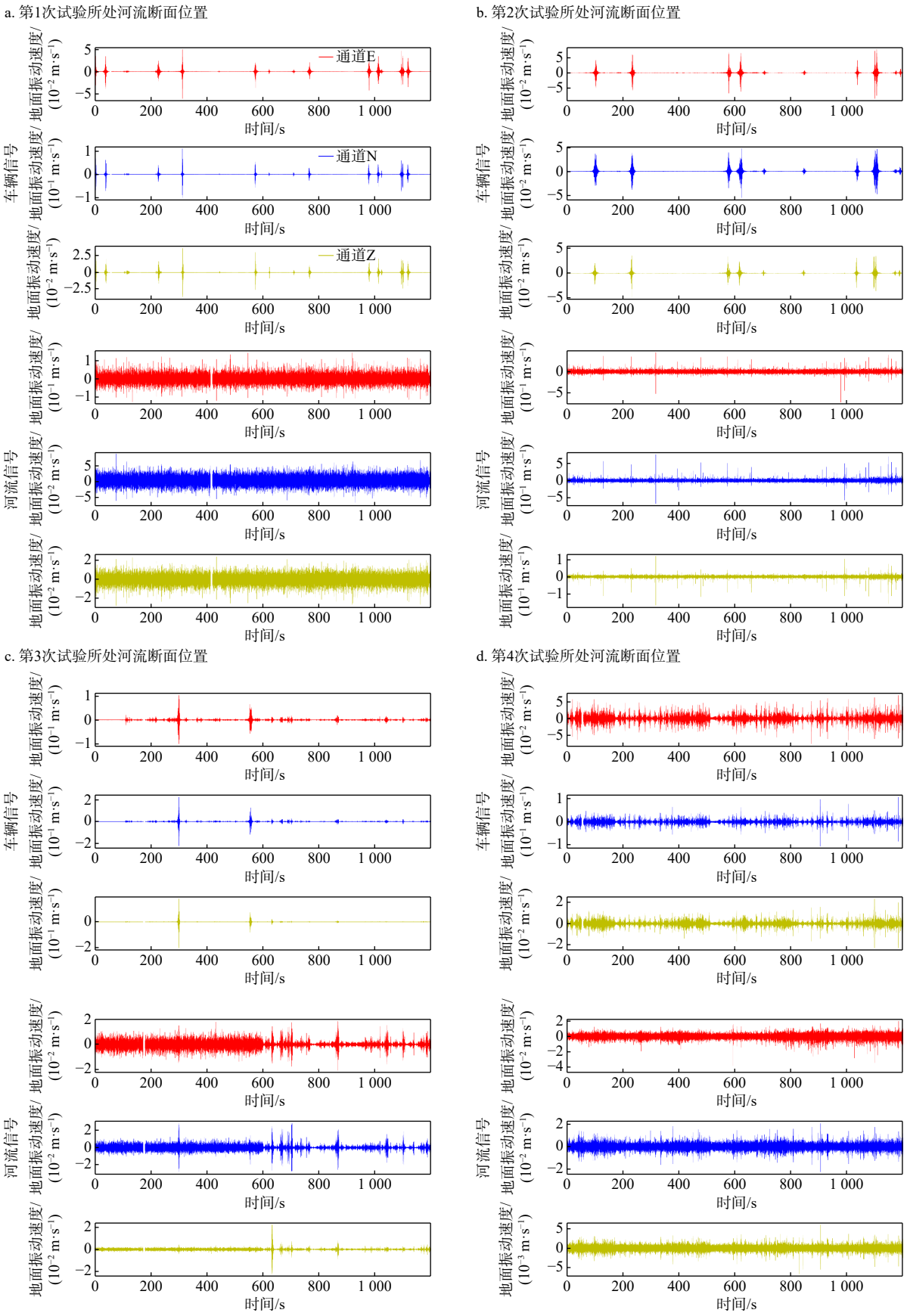


图 5　不同断面位置处河流信号和环境噪音中的车辆信号波形（通道 E 为微震设备 EW 方向接收到的信号；通道 N 为微震设备 NS 方向接收到的信号；通道 Z 为微震设备垂直方向接收到的信号；下同）

Fig. 5　Waveforms of river signals and vehicle signals at different section locations

河流信号和车辆信号的波形。基于快速傅立叶变换将时域内容转换至频域，得到微震信号的频谱图，再基于短时傅立叶变换(STFT)将微震地面速度的原始时间序列数据分割成若干片段，每个片段中傅立叶变换的数据点数(窗长度)为 200，窗口重叠 50%，窗口类型选择 Hamming 窗，得到微震信号的时频分析图。与此同时，为减少由于简单使用 FFT 产生的频谱方差，并增强时频分析的解释，使用一种依赖于 Welch 的重叠方法估计微震信号的平均功率谱密度 *PSD*，计算每个频率的平均功率，窗口为 1 s(200 个样本)，窗口重叠 50%，得到离散的 1 Hz 频率带[21]。

3　河流微震信号的物理特征

河流微震信号物理特征的研究是河流过程微震监测应用研究的基础[22-23]。微震信号的物理特征是区分河流过程信号与地震信号、人类活动等环境噪声和实现不同河流过程监测的重要依据[24]。本研究主要介绍河流微震信号的频率、振幅、震相等物理特征。

3.1　频　率

本研究基于梅水乡园村九曲河河流试验的微震监测数据，介绍河流产生的微震信号的频率特征，同时为尽量避免人类活动噪声的影响，选取部署于河道处及附近信噪比高的微震设备分析其频率特征[25]。

图 6 为第 1 次试验位置处河流产生的微震信号及其频谱特征，该处河床主要由砾石和卵石组成，卵石平均尺寸约为 13×10×5 cm，该处河流流速比位置 1 处大，测得最大流速为 1.569 m/s。从该处的时频分析图(图 6b)及频谱图(图 6c)可以看出，微震信号的能量分布在 1 ~ 60 Hz 频带，并无明显的分带，其中大部分能量分布在 2 ~ 12 Hz 频带，信号的中心频率为 17.4 Hz。

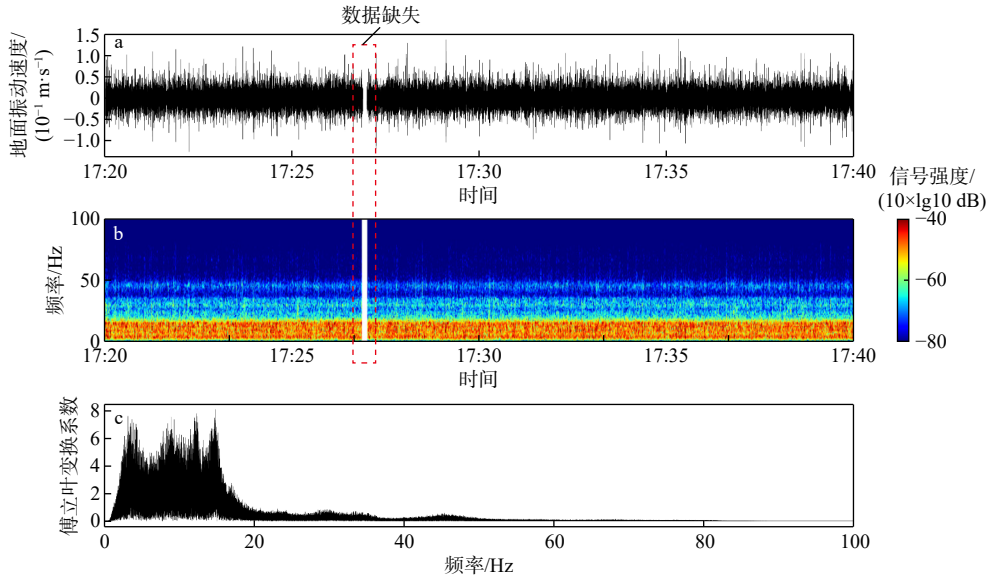


图 6　第 1 次试验位置 SZ4 微震基站通道 E 记录的河流产生的微震信号 (a ~ b) 及其频谱 (c) 特征

Fig. 6　Microseismic signals generated by the river (a-b) and their spectral characteristics (c) recorded by Chamel E of the SZ4 microseismic station at the 1st experiment location

DÍAZ 等[26] 在阿拉贡河的研究中发现 2 ~ 10 Hz 频带内的异常微震信号与阿拉贡河流量变化之间存在明显的相关性。BAKKER 等[27] 观察到 10 Hz 尺度下的地震功率与流量的关系与 GIMBERT 等[28] 的湍流模型预测的一致，而 50 Hz 的地震功率与测量的床载通量呈线性关系，与 TSAI 等[29] 的床载模型预测的一致。BURTIN 等[30] 研究表明了湍流流量及其变化倾向于激发低频地震功率(1 ~ 10 Hz)。结果表明，本试验所观察到的主要频带与前人所得基本一致，并且试验期间并无明显的床载运输[31]，地震能量主要由湍流贡献，因此推测试验频谱中的低频带 2 ~ 10 Hz 与河流水湍流过程相关，其能量的变化反映河流流量的变化，而比之更高的频段与河流冲击河床过程、少量的沉积物运输以及人类活动等相关[32-33]。

3.2　振　幅

本研究中振幅是指微震信号波形图中的速度(图 6a 中的纵坐标)，即微震设备(速度型)接收到的地面振动速度信号。该物理量的大小表征信号在单位时间内的能量大小，振幅愈大，单位时间内信号的能量愈大。信号的振幅在传播过程中受传播介质、

传播距离等因素影响，一般来说，低频信号振幅衰减较慢，高频信号振幅衰减较快。与湍流过程相比，河流床载运输引起的信号频率较高(>30 Hz)[18]，其信号随距离的增加更易于衰减，GIMBERT 等[28] 通过在离河流不同距离的地方部署微震台站，表明对床载运输的可靠估计可以从部署在离河流相对较近的微震台站获得，而使用部署在更远微震台站可以从微震信号中反演河床剪应力或水流深度。

3.3 震　相

地震能量在震源位置被激发后，以波的形式进行传播。地震波的基本类型有 2 种：从震源处以三维方式传播的体波(压缩波、剪切波)和沿着地球自由表面传播的面波(Rayleigh 波和 Love 波)。在大多数环境地震问题中，尤其是不涉及大型质量运动过程，微震信号以面波为主，并且与地震产生的信号相比，不同震相的到达时间是难以分辨的。目前对于河流过程地震波的传播方式多数学者认为是面波，如 GIMBERT 等[28] 认为河流过程产生的微震信号在地表浅层的传播由 Rayleigh 波和 Love 波混合组成，并且当微震台站所在的河岸地形坡度较小时，微震台站的垂直分量只受 Rayleigh 波的影响。BARRIÈRE 等[34] 在利用微震观测郊区低梯度砾石河床的床载运输过程时，在解释功率谱密度变化时认为其垂直方向的变化与 Rayleigh 波的优先产生有关，而滚动和滑动的床载运输模式可能是产生额外水平极化表面波(Love 波)的重要因素。

4　微震信号监测河流运动过程

河流床载运输过程、河流表面的碎浪、空化以及河流湍流过程在很宽的频率范围内产生地面振动，其中河流表面的碎浪、空化对于微震信号的贡献一般比记录的信号低几个数量级[35]，因此相对于其他河流过程可忽略不计，而床载通量的测量存在困难[36-40]，并且在试验期间并无明显的床载运输过程，所以本研究基于第 3 次实验微震处流速连续监测试验，主要研究利用河流微震信号监测河流的湍流过程(流速)。

研究河流位于道路旁边，在试验期间道路上会有车辆经过，其产生的信号可能会对试验造成影响，因此为了从自然源中区分人类地震噪声，在河流横向约 15m 处的道路旁部署了 SZ3 微震基站，这是人类活动的主要来源。图 7 给出了 SZ3 微震基站在整个试验期间记录的波形图，波形图在 15：55 和 15：59 时间点上出现异常的高振幅信号，该时间点与现场记录的车辆经过时间相对应。图 8 为截取的 15：55 时间点左右车辆产生的微震信号及其频谱特征，从车辆信号对应的时频分析图以及频谱图中可以看出，车辆信号的能量分布在 2 ~ 50 Hz 频带，其大部分能量分布在 7 ~ 22 Hz 频带上，最大能量位于 15 Hz，信号

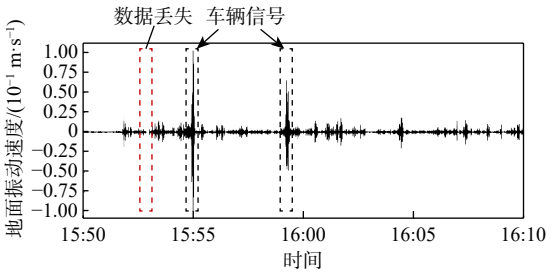


图 7　第 3 次试验位置处 SZ3 微震基站通道 E 记录波形图

Fig. 7　Waveform diagram recorded by Channel E of the SZ3 microseismic station at the 3rd experiment station

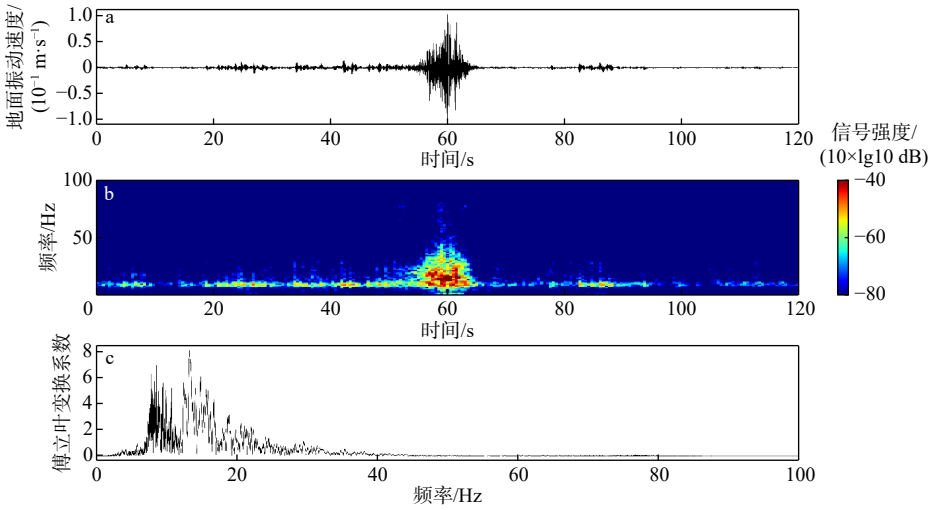


图 8　车辆产生的微震信号 (a ~ b) 及其频谱特征 (c)（SZ3 微震基站通道 E 15:55 记录的数据）

Fig. 8　Microseismic signals generated by vehicles (a-b) and their spectral characteristics (c)

的中心频率为 17.9 Hz。由 3.1 节可知 2 ~ 10 Hz 频带与河流湍流过程相关，因此为降低人类车辆信号的干扰，利用带通滤波器过滤掉 2 Hz 以下和 7 Hz 以上的信号，以最大程度的保留与湍流过程相关的信号。

在第 3 次试验位置处进行河流微震监测的同时，同步进行河流流速的连续测量，每间隔 1 min 测量离河岸 1.35 m 处的河流平均流速，整个试验期间的河流平均流速变化见图 9a，从图中可以看出试验期间河流的平均流速变化幅度很小，在 0.75 m/s 附近上下波动。微震信号选择信噪比最高的 SZ4 微震基站记录的数据(通道 E)，并绘制得到其波形图(图 9b)和时频分析图(图 9c)。观察 SZ4 微震基站记录的微震信号，其在后半时间微震信号的振幅陡然降低(图 9 灰色阴影区域)，明显存在异常，因此使用 15: 50 ~ 16: 00 时间段的微震信号数据研究河流流速的监测。

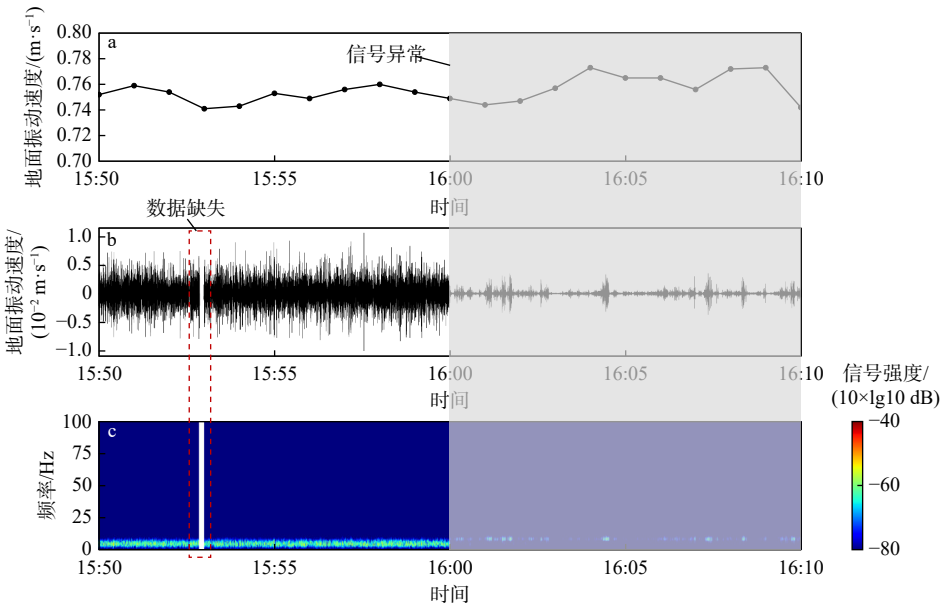


图 9　试验期间河流平均流速变化 (a) 与 SZ4 微震基站通道 E 记录的 2 ~ 7 Hz 频带上的波形图 (b) 及时频分析图 (c)

Fig. 9　Correlation between the average flow velocity changes of the river during the experiment (a), waveform diagram (b) and time-frequency analysis diagram (c) of signals in the 2-7 Hz frequency band recorded by Channel E of the SZ4 microseismic station

通过对 15: 50 ~ 16: 00 时间段连续微震信号时频分析图的观察，在 2 ~ 7 Hz 频带上的地震能量并无明显变化，基本保持恒定，其与平均流速变化在时间上可能保持一致。为了证实这一猜测，利用估计信号平均功率谱密度的方法计算得到每个频率在 1 min 时间内的平均地震功率，进而计算出所得微震信号在 2 ~ 7 Hz 这 1 频带内 1 min 时间内的平均地震功率，将其转化为能量的形式，并将得到的结果按时间序列绘制在同平均流速变化相匹配的同一时间轴上(图 10)。从图中可清楚的看出 SZ4 微震基站在 2 ~ 7 Hz 频带内记录的平均地震功率波动与同一时间河流平均流速波动基本符合，两者在时间尺度上具有较好的一致性，但也存在有异常部分(图 10 灰色阴影区域)，在该部分两者的波动存在较大差别，分析其原因可能是受到 15: 55 这一时间道路上车辆信号的干扰，使用滤波手段并不能完全过滤掉车辆的信号。以上结果表明，记录的微震信号在 2 ~ 7 Hz 频带与河流湍流流速具有很强的联系，通过对连续微震信号时频图的分析能够实现对湍流过程进行实时监测。

5　河流水文参数反演

5.1　反演模型建立

5.1.1　线性最小二乘回归模型

由多个震源产生的地震波形的总能量是每个过程贡献信号能量的总和。因此，不考虑河流床载运输产生的地震能量，总地震功率谱密度 PSD 是由水湍流(P_Q)、道路车辆(P_v)和其他噪声(P_N)产生的 PSD 之和($P=P_Q+P_v+P_N$)。在构建线性最小二乘回归模型时，进一步假设，对于一阶，河流湍流过程产生的 PSD 与代表该过程大小的变量呈线性缩放。因此，将给定频率 f 下的整个试验期间总地震 PSD (P_f)建模为流量(Q)产生的地震功率的线性组合，再加上给定频率 f 下的整个试验期间道路上车辆经过产生的地震功率(P_{vf})以及一些频率相关的背景噪声(N_f)。在试验期间河流无外界因素干扰流速和水位

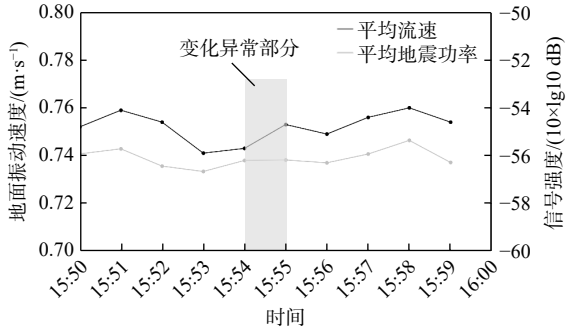


图 10　平均流速和平均地震功率变化对比图

Fig. 10　Comparison between average flow velocity and average seismic power

基本恒定，并且背景噪声是由仪器本身机械噪声主导的，因此假设流量和背景噪声随时间的推移保持恒定。在单一频率下，地震功率随时间的变化为：

$$P_f = a_f Q + P_{vf} + N_f, \tag{8}$$

式中：P_f 为频率 f 下的总地震 PSD；a_f 为频率 f 上流量的恒定线性系数；每次试验流量 Q 的取值见 2.1 节流量计算结果；N_f 为 SZ3 微震基站每个频率在无车辆等人类噪声影响的时间段内的平均功率。

系数 a 在所有频率上的全谱表示在给定微震台站上观测到的水湍流的相对谱贡献，其受到测量过程与地面速度之间的耦合，以及与距离、介质和频率相关的衰减（即格林函数）的影响。

在所有时间内从 P_f 中减去 N_f 和 P_{vf}，从而分离出水湍流的 PSD。选取每次试验前半时间段的微震数据，对每个频率的系数 a_f 进行最小二乘回归，从而得到方程：

$$P_f - N_f - P_{vf} = a_f Q。 \tag{9}$$

5.1.2　置信区间

系数 a 的置信区间（δ）依据区间估计的方法得到拟合系数在每个频率的个体误差：

$$\delta a_f = \frac{s_f}{\sqrt{n}} t_{e,0.95}, \tag{10}$$

式中：δa_f 为系数 a_f 的 95% 置信区间；n 为拟合的数据样本数量；$t_{e,0.95}$ 为 e 自由度和 95% 置信度的 t 分布值；s_f 为估计的测量标准偏差，其值为：

$$s_f = \sqrt{\frac{\sum (P_{f,obs} - P_{f,\mathrm{model}})^2}{e}}, \tag{11}$$

式中：$P_{f,obs}$ 为回归时间内在每个频率上观测到的 PSD；$P_{f,\mathrm{model}}$ 为回归时间内在每个频率上模型得到的 PSD；$e=n-m$ 为拟合的自由度数，其中 m 为拟合的自变量的数量。

因此 δa_f 表示系数 a_f 的 95% 的置信区间，其 95% 的置信区间的系数值为 $a_f \pm \delta a_f$。然而，本研究无法解释该模型中的所有误差来源，包括 Q、P_{vf}、P_f 中的任何观测不确定性，以及大于平均 N_f 的随机噪声峰值。计算也没有考虑得到地震 PSD 与流量之间的非线性关系所带来的任何模型偏差。因此，上述形式的不确定性评估视为参数不确定性的统计下界。

5.2　模型结果

5.2.1　回归结果

利用前 10 min 微震数据计算得到的每个分量（通道 E、N 和 Z 方向）和每个位置处（位置 1，2）湍流信噪比最高的微震设备所对应的流量回归系数如图 11 所示。回归系数 a_f 既包含了流量的测量单位（m^3/s）与湍流产生的地面速度信号之间的耦合，也包含了震源与微震设备之间各微震信号的衰减（即格林函数）。该系数还表示湍流过程对微震设备信号的频谱贡献，或单位流量传输的每频率功率。由于低频信号振幅衰减较慢，高频信号振幅衰减较快，因此图 11a，b 中流量系数在 60 Hz 以上频带为负值，其在 60 Hz 以上高频带上经历近乎完全的衰减。

流量系数在不同位置处和各方向分量之间表现出较大的变异性（图 11）。第 1 次试验位置的流量系数比第 3 次试验位置的流量系数小 1 个数量级。第

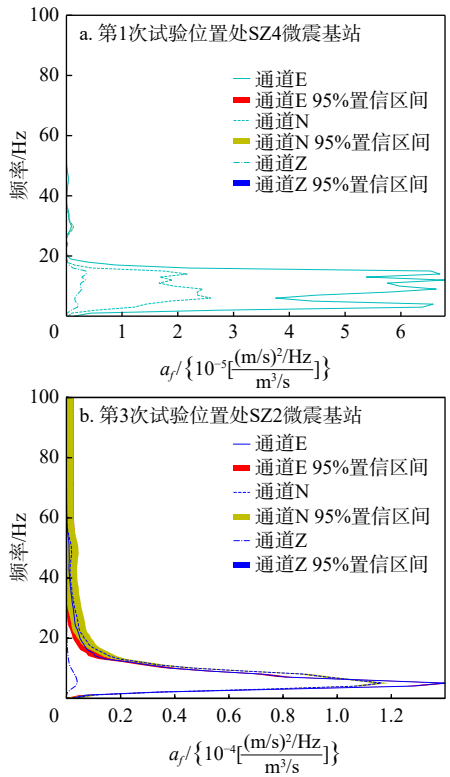


图 11　湍流过程在通道 E、N、Z 上的流量回归系数及 95% 置信区间

Fig. 11　Flow regression coefficients and 95% confidence intervals of the turbulent flow process in the E, N, and Z Channels

1 次试验位置分离出的湍流过程主要贡献集中的频带(1 ~ 20 Hz)比第 3 次试验位置的频带(2 ~ 12 Hz)更宽, 并且湍流过程的贡献在通道 E 方向上最大, 在通道 Z 方向上贡献很小。其中在第 1 次试验位置的流量系数出现多个峰值(通道 E), 对应峰值频率为 4, 10, 12, 14 Hz, 第 3 次试验位置的流量系数仅出现 1 个峰值(通道 E), 其峰值频率为 5 Hz, 2 处在低频处的峰值频率接近。

5.2.2　流量预测结果

由于本研究流量计算是利用测量的 1 min 平均流速得出, 为保证预测结果与测量数据相匹配, 将上述计算得到的第 1 次试验和第 2 次试验湍流相关的流量系数峰值(频率为 4, 5 Hz 处)代入式(12), 计算得到后 10 min 时间段内每隔 1 min 时刻的河流流量预测值, 预测结果与 2.1 节流量计算结果如图 12 所示。从两者的比对图中可以看出, 本研究所建立的线性近似模型的预测流量值与实际观测值接近, 预测流量值在对应观测值附近上下波动, 计算得到第 1 次试验和第 2 次试验预测流量值的平均值为 0.454 99, 0.548 12 m^3/s, 方差为 0.001 33, 0.006 76, 得到的方差结果表明预测值的离散程度低, 无较大波动, 与现场河流的实际状况相符合, 两处预测平均值的相对误差分别为 2.48%, 10.29%, 模型预测流量值的结果是比较准确的。

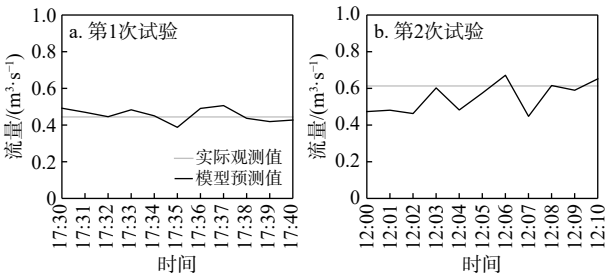


图 12　河流流量预测值与实际观测值对比图

Fig. 12　Comparison chart of predicted river discharge and observed discharge

5.2.3　河流流量预测模型

对于任何给定的时间 t, 利用给定频率 f 下的地震 PSD(P_f)和道路车辆产生的 PSD(P_{vf})数据, 以及上述校准的回归系数 a_f, 将式(9)重新排列, 得到 t 时刻河流流量 $Q_{pred}(t)$ 的预测方程:

$$Q_{pred}(t) = [P_f(t) - P_{vf}(t) - N_f]/a_f。 \quad (12)$$

式(12)给出了每个频率下的流量预测, 采用最小二乘法进行求解, 以最大化 1 ~ 100Hz 频率间的预测一致性。

在得到前 10 min 微震试验数据回归出系数 a_f 之后, 利用后 10 min 的微震试验数据通过式(12)计算各位置处的预测流量值。

6　结　论

(1)河流微震信号物理特征分析结果表明, 微震监测信号 2 ~ 10 Hz 频带与水湍流过程相关, 比之更高的频带包含其他河流过程以及人类活动的信息, 微震信号振幅与河流流速、流量存在直接关系, 河流过程产生的地震波主要以面波的形式传播。

(2)通过对第 3 次试验 SZ3 站台记录的车辆微震信号及其频谱特征分析, 利用带通滤波器保留 2 ~ 7 Hz 频带的微震信号, 以最大程度的排除车辆信号影响。采用 Welch 法计算出记录微震信号时频分析图上在 2 ~ 7 Hz 频带内 1 min 平均地震功率, 并转换为能量形式, 计算结果在时间尺度上与现场利用流量流速仪测得的 1 min 平均流速具有较好一致性, 对比结果表明, 依据河流连续微震监测的时频分析图能够实现对湍流过程的监测。

(3)基于多个震源产生微震信号的总能量为每个过程贡献能量的总和, 考虑道路车辆以及仪器噪声的贡献, 假设湍流产生的地震功率同河流流量呈线性关系, 建立量化地震功率与河流流量关系的线性回归模型, 由此推导出利用地震功率反演出河流流量的线性近似模型。通过分析第 1 次试验和第 2 次试验前 10 min 微震信号在每个频率下流量系数回归结果, 利用通道 E 湍流相关频带范围内峰值处的流量系数, 代入反演模型中反演出后 10 min 内每 min 的河流流量, 反演结果与实际测量值接近, 相对误差分别为 2.48%, 10.29%。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 梁以夫. 洪水成因及减灾对策 [J]. 广西水利水电, 1992(1): 2-4.
LIANG Y F. Causes of flood and countermeasures for disaster reduction[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1992(1): 2-4. (in Chinese with English abstract)

[2] 田国珍, 刘新立, 王平, 等. 中国洪水灾害风险区划及其成因分析 [J]. 灾害学, 2006, 21(2): 1-6.
TIAN G Z, LIU X L, WANG P, et al. Flood risk zoning and causal analysis in China[J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[3] 曹厚光. 陕西省汉江、嘉陵江流域 1981 年洪水灾害的成因 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 1984, 14(2): 77-93.
CAO H G. The origin of flood damage on the valleys of the Han and Jialing River of Shaanxi Province in 1981[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1984, 14(2): 77-93. (in Chinese with English abstract)

[4] 冯普林, 石长伟, 张广林. 渭河“2003”洪水灾害及其减灾措施的

分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 44-49.
FENG P L, SHI C W, ZHANG G L. Analysis of "2003" Weihe River flood and its disaster mitigation measures[J]. Journal of China Institute of Water, 2004, 2(1): 44-49. (in Chinese with English abstract)

[5] 罗志春. 西河"8.13"洪水灾害成因分析 [J]. 水利科技与经济, 2011, 17(3): 70-71.
LUO Z C. Cause analysis of "8.13" flood disaster in Xihe River[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(3): 70-71. (in Chinese)

[6] 李甲振, 郭新蕾, 巩同梁, 等. 无资料或少资料区河流流量监测与定量反演 [J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1420-1428.
LI J Z, GUO X L, GONG T L, et al. A method estimating natural runoff in regions with none or less data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1420-1428. (in Chinese with English abstract)

[7] 彭勃, 强思远, 施小清. 基于贝叶斯实验设计优化跨孔高密度电阻率法监测四维水文地质过程 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 293-301.
PENG B, QIANG S Y, SHI X Q. Optimizing 4D hydrogeological process monitoring using cross-hole electrical resistivity tomography(CHERT) via Bayesian experimental design[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 293-301. (in Chinese with English abstract)

[8] BURTIN A, HOVIUS N, MCARDELL B W, et al. Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment[J]. Earth Surface Dynamics, 2014, 2(1): 21-33.

[9] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. Nature, 2005, 436(7051): 686-688.

[10] GOVI M, MARAGA F, MOIA F. Seismic detectors for continuous bed load monitoring in a gravel stream[J]. Hydrological Sciences Journal, 1993, 38(2): 123-132.

[11] BURTIN A, BOLLINGER L, VERGNE J, et al. Spectral analysis of seismic noise induced by rivers: A new tool to monitor spatiotemporal changes in stream hydrodynamics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113(B5): 1-14.

[12] ROTH D L, BRODSKY E E, FINNEGAN N J, et al. Bed load sediment transport inferred from seismic signals near a river[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(4): 725-747.

[13] ANTHONY R E, ASTER R C, RYAN S, et al. Measuring mountain river discharge using seismographs emplaced within the hyporheic zone[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(2): 210-228.

[14] COOK K L, REKAPALLI R, DIETZE M, et al. Detection and potential early warning of catastrophic flow events with regional seismic networks[J]. Science, 2021, 374(6563): 87-92.

[15] FOULDS S A, GRIFFITHS H M, MACKLIN M G, et al. Geomorphological records of extreme floods and their relationship to decadal-scale climate change[J]. Geomorphology, 2014, 216: 193-207.

[16] GAEUMAN D. High-flow gravel injection for constructing designed in-channel features[J]. River Research and Applications, 2014, 30(6): 685-706.

[17] RAZAVI T, COULIBALY P. Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(8): 958-975.

[18] POLI P, BOAGA J, MOLINARI I, et al. The 2020 coronavirus lockdown and seismic monitoring of anthropic activities in northern Italy[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 9404.

[19] HERSCHY R. The velocity-area method[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1993, 4(1): 7-10.

[20] GENÇ O, ARDıÇLıOĞLU M, AĞıRALIOĞLU N. Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 41: 115-120.

[21] WELCH P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1967, 15(2): 70-73.

[22] 柳云龙, 田有, 冯晅, 等. 微震技术与应用研究综述 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1801-1808.
LIU Y L, TIAN Y, FENG X, et al. Review of microseism technology and its application[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 1801-1808. (in Chinese with English abstract)

[23] 冯甜, 吴建平, 房立华. 微震研究与应用进展 [J]. 中国地震, 2021, 37(2): 261-272.
FENG T, WU J P, FANG L H. A review on research and application of microseismicity[J]. Earthquake Research in China, 2021, 37(2): 261-272. (in Chinese with English abstract)

[24] ADERHOLD K, ANDERSON K E, REUSCH A M, et al. Data quality of collocated portable broadband seismometers using direct burial and vault emplacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(5): 2420-2432.

[25] FARANDA D, BOURDIN S, GINESTA M, et al. A climate-change attribution retrospective of some impactful weather extremes of 2021[J]. Weather and Climate Dynamics, 2022, 3(4): 1311-1340.

[26] DÍAZ J, RUÍZ M, CRESCENTINI L, et al. Seismic monitoring of an alpine mountain river[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(4): 3276-3289.

[27] BAKKER M, GIMBERT F, GEAY T, et al. Field application and validation of a seismic bedload transport model[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(5): 1-23.

[28] GIMBERT F, TSAI V C, LAMB M P. A physical model for seismic noise generation by turbulent flow in rivers[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(10): 2209-2238.

[29] TSAI V C, MINCHEW B, LAMB M P, et al. A physical model for seismic noise generation from sediment transport in rivers[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(2): 1-6.

[30] BURTIN A, CATTIN R, BOLLINGER L, et al. Towards the hydrologic and bed load monitoring from high-frequency seismic noise in a braided river: The "torrent de St Pierre", French Alps[J]. Journal of Hydrology, 2011, 408(1/2): 43-53.

[31] HSU L, FINNEGAN N J, BRODSKY E E. A seismic signature of river bedload transport during storm events[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): 1-6.

[32] PICOZZI M, COVIELLO V, PALO M, et al. Seismic signature of an extreme hydro-meteorological event in Italy[J]. NPJ Natural Hazards, 2024, 1(1): 1-9.

[33] CHIMENE C A, CAMPOS J N B. The design flood under two approaches: Synthetic storm hyetograph and observed storm hyetograph[J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2020, 8(3): 171-182.

[34] BARRIÈRE J, OTH A, HOSTACHE R, et al. Bed load transport monitoring using seismic observations in a low-gradient rural gravel bed stream[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(7): 2294-2301.

[35] LAROSE E, CARRIÈRE S, VOISIN C, et al. Environmental seis-

mology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 116: 62-74.
[36] SCHMANDT B, ASTER R C, SCHERLER D, et al. Multiple fluvial processes detected by riverside seismic and infrasound monitoring of a controlled flood in the Grand Canyon[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(18): 4858-4863.
[37] TUROWSKI J M, BADOUX A, RICKENMANN D. Start and end of bedload transport in gravel-bed streams[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(4): 1-5.
[38] TUROWSKI J M, BLOEM J P. The influence of sediment thickness on energy delivery to the bed by bedload impacts[J]. Geodinamica Acta, 2016, 28(3): 199-208.
[39] VIPARELLI E, GAEUMAN D, WILCOCK P R, et al. A model to predict the evolution of a gravel bed river under an imposed cyclic hydrograph and its application to the Trinity River[J]. Water Resources Research, 2011, 47(2): 1-22.
[40] 曹凯, 卢渊, 庞小龙, 等. 基于微震事件频次的采空区沉陷变形智能预警方法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 78-89.
CAO K, LU Y, PANG X L, et al. Intelligent early warning method for subsidence deformation in goaf based on the frequency of microseismic events[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 78-89. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于微震技术的河流过程监测及水文参数反演的初步探索”

Preliminary exploration of river process monitoring and hydrological parameter inversion based on microseismic technology

FENG Liang[1a,1b*], ZHANG Shizhe[1a,2,3], XIE Bin[4], ZHOU Xiaoyue[1a], XU Wei[1a], WANG Yanmei[1a]

1a. School of Resources and Environmental Engineering; 1b. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Ecology Protection of River Headwaters, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;
4. Ganzhou Earthquake Monitoring Center Station, Jiangxi Provincial Seismological Bureau, Ganzhou Jiangxi 341000, China

* Corresponding author, E-mail: liang.feng@jxust.edu.cn

Abstract: River monitoring tends to be adopt remote sensing and intelligent technologies. Traditional river monitoring techniques are time-consuming and labor-intensive, and face the risks of instrument damage and missing data during floods. Benefiting from the advantages of remote non-contact operation, low cost and 24-hour continuous monitoring, microseismic technology is increasingly applied in river monitoring. In this paper, field microseismic monitoring experiments on rivers were conducted to monitor and analyze the dynamic vibration signals of river processes. Thereby obtaining the physical characteristics of microseismic signals generated by river turbulence. On this basis, a band-pass filtering method was used to retain signals in the 2-7 Hz frequency band. The Welch method, was employed to calculate the 1-minute average seismic power within the 2-7 Hz frequency band from the time-frequency analysis diagram of microseismic signals, which was then converted energy form and matched with the field measured river hydrological data to evaluate the potential of microseismic technology in river monitoring. To acquire the hydrological parameters of the rivers, a simple linear regression model was proposed to quantify the relationship between the average power spectral density (PSD) and the river turbulence process. A linear approximation model for inverting river discharge was derived accordingly. The inversion results of the model fluctuated around the measured values with a relative errors within 10.29%, indicating high accuracy. This study is a preliminary exploration of field microseismic monitoring experiments on rivers. The research results can provide a reference and theoretical basis for remote sensing and intelligent monitoring of river floods and normal hydrology relying on the national high-density seismic network.

Key words: microseismic monitoring; river process monitoring; time-frequency analysis; power spectral density (PSD); discharge inversion; hydrological parameter inversion

Received: 2024-06-03; Revised: 2024-07-25; Accepted: 2024-07-26

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240293