

利用微震数据推断雨的地震特征

周晓悦, 陈宇强

江西理工大学, 江西 赣州 341000

DOI:10.61369/ERA.2026030017

摘 要 : 地震仪器越来越多地被用于监测河流活动以及量化洪水期间的泥沙运输, 在降雨期间, 产生的涉及水流、泥沙、降雨和风的复杂地震记录。因此, 需要对降雨的地震特征进行地震表征, 以更好地分析每个水流过程并提高我们对河流地震特征的了解。在本研究中, 我们通过沿河岸边部署的地震仪记录的数据, 实验研究了降雨的地震响应, 这些地震仪、雷达流量计和雨量计共位。结果表明, 在降雨期间地震噪声的功率谱密度 (PSD) 在 40–90 Hz 的频率范围内对降雨增强, 地震信号能量与降雨量 5 分钟均方根在时间序列上有较好的一致性, 说明利用微震信号监测降雨事件及其水文效应是可行且有效的。

关键词 : 微震信号; 频谱分析; 降雨地震特征

Inferring the Seismic Characteristics of Rainfall from Microseismic Data

Zhou Xiaoyue, Chen Yuqiang

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000

Abstract : Seismic instruments are increasingly being employed to monitor fluvial activities and quantify sediment transport during floods. During rainfall events, complex seismic records associated with water flow, sediment movement, precipitation and wind are generated. Therefore, it is necessary to conduct seismic characterization of the seismic characteristics of rainfall, so as to better analyze each hydrological process and enhance our understanding of fluvial seismic signatures. In this study, we experimentally investigated the seismic response to rainfall based on data recorded by seismometers deployed along the riverbank, which were co-located with radar current meters and rain gauges. The results show that the power spectral density (PSD) of seismic noise during rainfall is enhanced in the frequency range of 40–90 Hz. Moreover, the seismic signal energy exhibits a good temporal consistency with the 5-minute root mean square of rainfall intensity. These findings indicate that it is feasible and effective to use microseismic signals for monitoring rainfall events and their hydrological effects.

Keywords : microseismic signal; spectral analysis; seismic characteristics of rainfall

引言

雨水相关的自然风险可能导致重大的环境、基础设施破坏和危及人类生命安全^[1,2]。由降雨引发的洪水的主要影响之一是河流中的泥沙运输, 这可能会破坏河流旁边的设施^[3]。更好地监测河流活动和泥沙运输有助于最大限度地减少由洪水引起的损害。关于雨的地震特征在文献中记载得很少, 在过去十年中, 一些实验在河流附近部署地震仪用来监测河流活动^[4,5], 但其中只有少数关注雨的特征本身^[6]。尽管这些研究的环境不同, 但它们记录了雨滴下落发出的信号, 这些信号通常在时间和空间上同时发生, 并且在可能的重叠频率范围内。因此, 通过地震数据监测河流活动需要更好地了解雨的地震特征。这种方法在研究滑坡或岩崩时尤其有帮助, 因为大量降雨是这些危险过程的主要触发因素^[7,8]。此类实验方法中的一个关键问题是地震仪的物理特性及其记录雨声特征的能力。使用宽带地震仪或高频地震仪进行的地震研究表明^[9], 雨的地震特征在约 80–480 Hz 的频率范围内占主导地位, 强调了较大雨滴对地震信号贡献的重要性^[6]。他们的结果还显示了地震噪声与雨强度 (或动能) 之间的幂律关系。因此, 使用地震仪监测降雨的特征取决于地震传感器的带宽、其高截止频率以及采集系统的采样频率。

为了更好地区分河流地震噪声、降雨地震噪声以及其他信号, 尤其是更好地监测降水期间的泥沙运输, 我们在本研究中开发了一种实验方法来表征和量化地震传感器记录的雨的地震特征。以下分析了地震仪在频率大于 0.5 Hz 时记录的频谱内容, 以量化并讨论雨的特征及其频率域。在考虑降水量的情况下, 分析了记录的地震噪声的振幅。

一、仪器设置、数据处理方法

(一) 仪器设置

本次研究在贡江河流的一条支流进行河流长期监测实验，在监测实验中利用微震仪器、雷达流量计和雨量桶对监测流域的地震噪声和流速、流量、水深、降雨进行监测，实验装置如图1所示。



图1 实验监测设备

实验一共使用2台微震监测设备、雷达流量计和雨量计。在表1中具体展示仪器安装位置具体坐标，其中S5安装在距离河流0.3m远的岸边进行河道外监测，雷达流量计和雨量桶安装在监测流域的正上方，具体安装位置如图2所示。

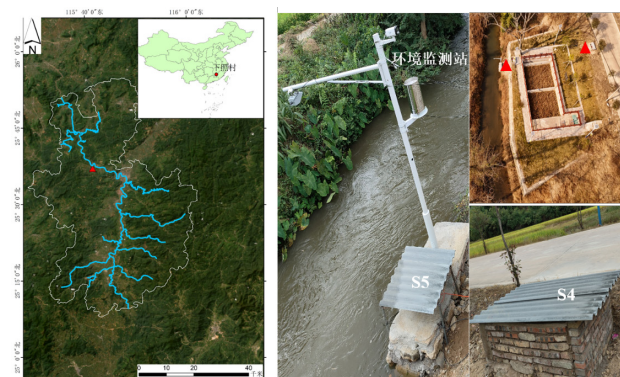


图2 实验装置布设图

表1: 仪器安装位置具体坐标

名称	经度	纬度	高程 (m)
S4	115.693329	25.617544	166.08
雷达流量计	115.69342	25.617373	174.67
雨量计	115.693413	25.617304	169.02
S5	115.693405	25.617311	161.32

(二) 数据处理方法

本文基于 Python 编程将全部微震原始数据转换为地面速度，得到信号的波形图。基于快速傅里叶变换将时域内容转换至频域，得到微震信号的频谱图，再基于短时傅里叶变换 (STFT) 将微震地面速度的原始时间序列数据分割成若干片段，每个片段中傅里叶变换的数据点数 (窗长度) 为200，窗口重叠50%，窗口类型选择 Hanming 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%，得到离散频率带。

二、下照村气象概况

研究区会昌县下照村属中亚热带季风型温暖湿润气候区，具

有山区立体气候明显的特征，气候温和热量足，日照充裕光能佳，雨水不均易旱涝，四季分明差异大。年平均气温19.3摄氏度，一月份平均气温8.3摄氏度，七月份平均气温28.7摄氏度；极端最低气温-6.7摄氏度，极端最高气温39.5摄氏度；平均无霜280天，年平均降雨量1624毫米，春夏多雨，秋冬少雨，尤其在4-6月降雨集中，平均可达752.9毫米，占全年总雨量的48.4%，常引起洪涝灾害，而7-9月的年平均降雨量只有388.1毫米，仅占全年总量的24%，加之蒸发量又大于降雨量253.5毫米，常发生干旱。月平均降雨量与气温图如图3所示，灾害性天气主要有春季低温、夏季洪涝、干旱以及秋季“寒露风”。研究区境内河流众多，南来的湘江与东来的绵江汇成贡江直入赣江。县内溪流纵横，有大小河流319条，且河床比降大，境内河流总长1726 km，水域面积73.64 km²。

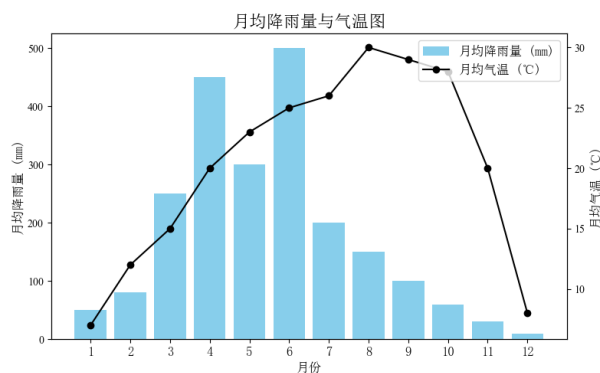


图3 研究区月平均降雨量与月均气温图

三、结果：地震频谱分析

微震信号物理特征的研究是微震监测应用研究的基础。微震信号的物理特征是区分降雨信号与地震信号、人类活动等环境噪声的重要依据。

(一) 人为地震特征

为了区分不同来源的地震信号，明确不同人类活动在地震记录中的表现形式，实验地点位于县道旁，在白天7点至夜晚8点有较多车辆行人通过，所以将实验监测时间段内采集的六类典型信号进行归类分析，包括大货车、汽车、摩托三轮车、摩托车、行人及电动车经过激发的微震信号。每类信号均绘制了时域波形与功率谱密度曲线，分别进行时域波形与频谱分析，以揭示其在能量分布与频率特征方面的差异 (如图4所示)。

1. 大货车信号

大货车通过时，地震记录呈现明显的高幅值、长持续时间脉动特征，峰值振幅远高于背景噪声，持续时间可达数十秒。在时域中，可见其包络线呈单峰结构，且振幅变化陡峭，能量集中在2-8 Hz 范围内，低频成分占比较大，反映出大货车车辆自重较大、轮胎与路面作用周期较长的特性。

2. 汽车信号

汽车信号的振幅较大货车显著降低，持续时间相对较短 (约5-15秒)。频谱分布主要集中在4-10 Hz 区间，低频能量弱于大货车，但中高频部分有所增强，表现为能量峰值位置略向高频移动。

3. 摩托三轮车信号

摩托三轮车的振幅介于汽车与摩托车之间，但波形中可见较

为规律的振动包络，反映出发动机与车身共振特性。频域特征表现为 5 - 12 Hz 的较宽频带分布，且在 8 - 10 Hz 处有明显能量峰值。

4. 摩托车信号

摩托车信号振幅较低，持续时间短（通常不足 8 秒），但在时域中仍可识别明显的轮胎冲击脉动。频域分析表明能量集中在 6 - 15 Hz 范围，且高频成分占比显著，高于其他车型。

5. 行人信号

行人信号振幅极低，接近背景噪声水平，波形中呈现间断的小幅脉冲，持续时间较长（可达数十秒）。频谱能量主要分布在 8 - 18Hz，高频部分较明显，反映出行人步伐冲击作用短促且高频。

6. 电动车信号

电动车信号振幅与摩托车相近，但波形更加平稳，缺少发动机燃爆引起的脉动。频谱分布集中在 5 - 12 Hz，低频和中频段较为均衡，高频成分弱于摩托车，反映出其电机驱动的平顺性。

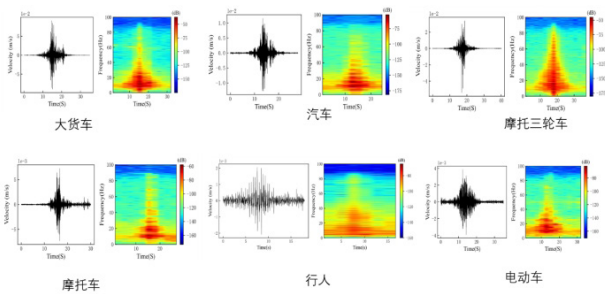


图4不同人类活动的噪声信号时频图

图5展示了研究区域人类活动信号在白天与夜间的功率谱密度 (PSD) 差异。整体上，白天信号在 0 - 30 Hz 范围内的能量显著高于夜间，尤其在 5 Hz、15 Hz 附近存在明显峰值，最大幅值可超过 50 dB，而夜间同频段的峰值幅度仅约为 10 dB。从图中可以看出白天的频谱特征峰分布较为密集，且多个峰值频段对应机动车、摩托车及其他人类活动的特征频率，反映出白天交通运输及人类生产活动频繁，对地震记录产生了较强的低频至中频干扰。夜间曲线整体平缓，仅在 10 - 20 Hz 范围内出现弱峰值，说明该时段人类活动显著减少，地震背景噪声水平较低。该结果表明，白天与夜间在地震记录的频谱特征上存在显著差异，人类活动是导致日间噪声水平升高的重要因素。

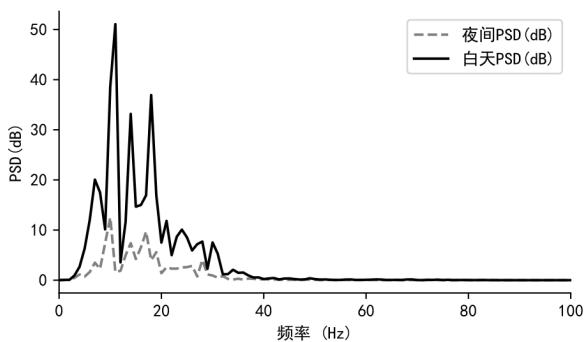


图5人类活动在白天的夜间间的差异

(二) 降雨地震特征

为分析降雨事件在时频域中的能量分布特性，对三次降雨

(2025年3.3-3.5、2025年6.2-6.4和2024.11.15)时的地震信号进行了频谱分析。频谱计算采用 Welch 方法估计功率谱密度，连续功率谱密度结果 (图6) 显示，雨的活动可以在时频域中与人类活动噪声重叠。为了研究雨的频谱特性，我们研究了降雨期间记录的数据，时频图表明降雨活动的记录在约 20-90Hz 的频率范围内，这与先前学者研究的内容一致^[5]。在 40至90Hz 的频率范围内，我们的结果表明，雨的地震能量随着频率的增加而增加。图3.3中的玫红色虚线框中显示的是降雨事件，可以看到，在这些事件窗口内，频谱能量显著增强，特别是在 40至90 Hz 范围出现清晰的峰值，这一集中能量区间通常代表快速增强的降雨过程（如短时强降雨），说明降雨强度的短时波动具有明确的频率响应。降雨和噪声信号在 40Hz 以下存在较低且复杂的功率谱密度差异，但雨在 30Hz 频段以上主导噪声频率。本次研究中，降雨活动中微震信号的主要频率在 20至90Hz 之间。在 40Hz 以下，降雨特征与其他活动重叠，而在 90Hz 以上，地震信号强度降低，功率谱密度的强度取决于降雨强度的增强。

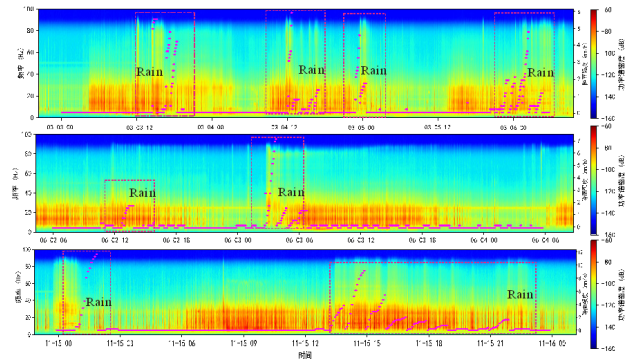


图6. 三次降雨期间降雨和地震频谱的叠加图 (从上至下依次是2025年3.3-3.5、2025年6.2-6.4和2024.11.15三次降雨事件)

图7展示了降雨强度时间序列与地震能量时间序列的同步变化曲线。可以明显看到，在降雨事件发生期间，地震能量出现了与降雨强度相对应的同步增强。两者时间序列趋势整体一致性较强，表明降雨过程能够显著影响浅部地表的微震信号，尤其是在河岸、松散堆积体以及饱和水面等地质环境中。在降雨骤增的 5 - 15 分钟内，地震能量随即出现快速上升，反映出雨滴撞击地表、径流形成的以及初期汇流过程所诱发的高频微震响应。对于持续型降雨事件，地震能量呈现稳态升高、延迟下降的特征，说明地表的浅层介质在受水入渗、孔隙水压力升高及地表径流强度增强的条件下，会产生连续性的微震信号能量增强。降雨事件的频率结构决定了其在不同时间尺度上的能量特征，而地震能量对这些频率成分具有显著响应。因此，利用微震信号监测降雨事件及其水文效应是可行且有效的，为后续开展降雨期间河流的流量反演及暴雨径流监测奠定了数据基础。

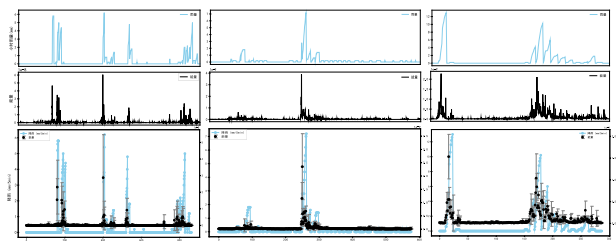


图7. 三次降雨事件的降雨量和能量时间序列图 (从左至右分别是2025年3.3-3.5、2025年6.2-6.4和2024.11.15三次降雨事件)

为揭示降雨强度变化对微震能量响应特征的影响,本次研究依据降雨量大小将研究期间的降雨过程划分为无雨(0 mm/h)、小雨(0-10 mm/h)、中雨(10-20 mm/h)和大雨(>20 mm/h)四个强度等级,并统计分析各降雨强度等级下对应时间窗内的地震能量分布特征(如图8所示)。结果表明,在无雨条件下,地震能量整体处于较低量级 1.2×10^{-11} ,能量分布相对集中,箱体范围较窄,表明研究区域背景微震噪声水平较为稳定。当降雨强度由无雨逐渐增强至小雨和中雨等级时,地震能量的中位数及上四分位值均呈现出逐步抬升的趋势,小雨和中雨时处于 4.5×10^{-10} 和 1.7×10^{-9} 量级,同时能量分布范围有所扩大,说明降雨过程开始对地表及河道系统产生扰动,并在微震信号中体现为能量增强。在大雨条件下,地震能量表现出显著增强特征,其能量中位数明显高于无雨及小雨和中雨等级处于 7.4×10^{-8} 量级,同时能量分布的离散程度显著增大。散点分布显示,在强降雨过程中,不同时间窗内的能量响应差异较大,反映出降雨诱发的微震信号具有明显的非稳定性和间歇性特征,总体来看,地震能量随降雨强度增加呈现出明显的非线性增长趋势。

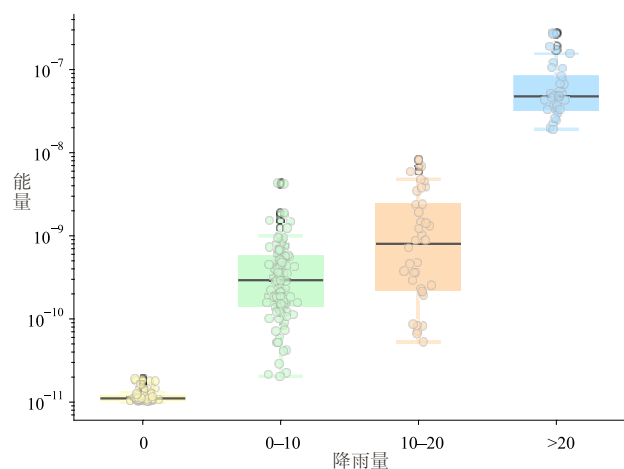


图8 不同降雨量对应的微震信号能量的箱线图

上述结果表明,降雨强度是影响研究区微震能量变化的重要控制因素。弱降雨条件下,降雨主要通过润湿地表和浅层介质,对地表—河道系统的扰动有限,因此对应的微震能量仅表现为

轻微增强。而在中雨及大雨条件下,降雨强度显著增大,地表径流形成并增强,河道水流流量增加以及可能带动河床泥沙运动,从而引发更强烈的微震响应。此外,大雨条件下地震能量分布离散度的显著增大,表明微震响应过程并非简单的线性叠加,而是受到多种因素的共同影响,可能是降雨时空分布不均、地表介质非均质性以及局部汇流过程的差异等。这种复杂性使得在强降雨条件下,不同时间窗内的微震能量响应存在较大波动。但是在部分无雨条件下仍可观测到相对较高的能量值,可能与非降雨因素(如背景环境噪声或局部扰动事件)有关。因此,在未来有关分析中有必要结合时间序列特征及频谱特征,对降雨诱发信号与其他噪声源进行进一步区分,不同降雨强度等级下地震能量统计分布的差异,为利用微震信号反演或表征降雨及水动力过程提供了重要的定量依据。

四、结论

本次研究依托下照村河流进行的监测实验,综合利用微震仪、雷达流量计与雨量计的同步观测数据,系统分析降雨过程中的地震响应特征通过对多次降雨事件的分析,获得了以下主要认识和结论。

通过对不同类型人为活动信号与降雨信号的时域和频域特征进行对比分析,明确了人类活动主要集中在0-30 Hz频段,而降雨诱发的地震信号在中高频段表现更为显著。研究结果表明,降雨事件在40-90 Hz频率范围内引起地震功率谱密度的显著增强,该频段内地震能量随降雨强度增加而明显升高,且与人类活动噪声具有较好的可区分性。这一结果进一步验证了微震信号在高频段对降雨过程具有较高敏感性,为降雨地震特征的识别提供了可靠的频率依据。

通过对降雨时间序列与地震能量时间序列的对比分析发现,在降雨发生及增强阶段,地震能量呈现出同步上升的变化趋势,二者在5分钟尺度上的相关性显著,相关系数普遍较高。这表明降雨过程能够有效激发高频微震信号,微震监测可作为降雨过程中的重要补充监测手段。

参考文献

- [1] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [2] 单云锋, 李为乐, 周胜森, 等. 长江上游区域滑坡灾害生态风险评估[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11437-11449.
- [3] 杨春宝. GPRS 技术在水文监测系统中的应用[J]. 能源与节能, 2018, (01): 86-87.
- [4] 柯樱海, 甄贞, 李小娟, 等. 遥感导论[M]. 中国水利水电出版社: 2019.01.178.
- [5] 柳云龙, 田有, 冯珏, 等. 微震技术与应用研究综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(04): 1801-1808.
- [6] 李甲振, 郭新蕾, 巩同森, 等. 无资料或少资料区河流量监测与定量反演[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1420-1428.
- [7] Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3), 239 - 267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- [8] Helmstetter, A., & Garambois, S. (2010). Seismic monitoring of S é chilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. *Journal of Geophysical Research*, 115(F3), F03016. <https://doi.org/10.1029/2009jf001532>.