•水灾害防治与水环境调控•

DOI:10.12454/j.jsuese.202301052

本刊网刊

山区河流推移质输移高频声震信号监测研究进展

陈　政[1,2],方卫华[3],许少华[4],罗　铭[5],何思明[6,7]

(1.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川 成都 610059;2.瑞士联邦森林、雪与景观研究所,苏黎世 比尔门施托夫 8903;3.水利部 南京水利水文自动化研究所,江苏 南京 210012;4.逢甲大学,台湾 台中 407102;5.四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室,四川 成都 610065;6.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610299;7.中国科学院大学,北京 100049)

摘　要:对山区河流推移质输移过程的定量预测是开展山区水沙灾害评估及水利工程建设的关键所在。然而,陡急山区河推移质输沙率显示出强烈的时空脉动性。受限于当前对推移质输移过程的测量手段,现有对推移质输移过程的认识仍十分有限。针对传统直接测量方法采样效率低且可达性差,难以实现对推移质输沙率长期、连续且精细化测定的技术问题,系统论述基于高频声震信号的山区河流推移质输移监测技术研究进展,为下一步相关研究提供突破口。推移质输移过程诱发的高频声震信号为其运动规律研究及输沙参数反演提供新途径,通过构建不同类型的推移质声震监测系统为载体,监测和记录推移质碰撞声震能量,解析声震信号诱发机制,推演推移质输沙关键参数,最终完成对山区河流推移质全过程输沙通量的动态计算。山区河流推移质输移过程高频声震信号监测研究的关键问题和难点体现在以下4个方面:1)推移质多源声震监测系统的构建。全方位记录推移质碰撞、冲击河床所激发的高频声震信号。2)推移质输移声震信号特征识别与计算。通过对监测震动信号进行降噪、卷积变换和特征分析,获取信号波包、脉冲响应、振幅分布、特征频率及功率谱密度等重要参数。3)推移质高频声震信号解译算法。实现推移质震源空间定位、信号震源物理模型构建及信号传播与衰减模型的构建。4)推移质输沙物理参数精细化反演。通过监测震动信号结合所构建标定模型反演计算推移质分组粒径、输移速度、运动模式及输沙率等关键参数。针对上述4个方面的内容,结合最新研究成果,对高频声震信号在陡峭山区河流推移质输移过程监测方面的研究进展进行总结和讨论,并对目前研究领域面临的几个问题做出建议:构建基于多传感元件普适性更强的声震联合监测系统,开展更为精细的推移输声震信震源机制研究,系统性建立各信号响应指标与输沙参数指标的数据库,可基于机器学习方法实现更为高效的推移质输沙过程反演。本文可为完善山区河流推移质输移监测体系、水沙灾害定量评估、山区水利工程建设与长期运营等方面提供科学依据。

关键词:山区河流;推移质;声震信号;监测系统;震源机制;输沙率

中图分类号:TV143　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2025)06-0001-17

随着全球气候变暖,极端降雨频现,高山区山洪灾害呈现广发与频发的趋势[1]。山区高能水流在动力演进过程中往往伴随着强烈的推移质泥沙输移,对山洪泥石流等水生灾害致灾具有重要影响,严重威胁山区城镇安全、工程建设及环境治理[2]。此外,大量推移质泥沙输移对河道冲淤演化起着关键性控制作用[3–4]。因此,定量监测山区河流推移质的输移过程,是研究河床演化变迁规律的前提条件,对山区水利工程建设运营具有重大意义。国内外许多学者对推移质进行了大量研究和总结[5–7],提出了依据不同指标建立起来的各种推移质输沙率模型[8–11],包括剪应力指标[12–15]、水流功率/能量指标[16–17],以及基于概率论的统计模型[18–19]。总体而言,推移质输沙计算的通用表达即为建立输沙率与水流强度指标之间的相关性[8]。研究指出,各类推移质模型均能在一定范围内反映实测资料或进行输沙率预测,然而都或多或少存在着一些缺陷[5]。各输沙模型中的参数取值或指标适用范围并不十分明确,使得当相关公式应用于山区河流推移质输

收稿日期:2023 – 12 – 21　　**修回日期:**2024 – 04 – 28　　**网络出版日期:**2024 – 05 – 30

基金项目:国家自然科学基金项目(42307254);四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0861);成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室基金项目(SKLGP2022Z024);四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室基金项目(SKHL2224)

作者简介:陈　政(1993—),男,特聘研究员,博士. 研究方向:山洪地质灾害监测. E-mail:zheng.chen@cdut.edu.cn

沙率计算时往往差异巨大[20]。特别是对于推移质分组输沙率的计算，主要通过总输沙率乘以推移质级配换算得到[21]，但如何得到推移质级配曲线仍然存在问题。因此，关于各模型的适用性还未有定论[22−23]，且对于粗沙卵石河床的山区河流，针对推移质输沙过程的相关研究仍然十分有限[24]。因此，受限于测量手段，研究者对山区河流推移质的输移特性尚未得到系统认识。

人工采样检测对推移质的测量最早可追溯到20世纪初，测量方法主要是在河道中设置集沙池或采样器直接收集[25−26]。按器具样式主要可分为网篮式、压差式、锚固式，如：国外的涡流式（vortex）和传送带式（conveyor-belt）采样器[27−28]、网架式 Helley−Smith 采样器[29−30]、Bunte 推移质捕捉器[31]、篮式采样器及槽式采样器；国内有代表性的主要有四川水文总站研制的 M1、M2 型采样器[32]，重庆水文总站研制的 Y64 型卵石采样器[33]，长江委研制的 Y802 型卵石采样器[34]。一般来讲，推移质的测量精度受所采用的物理取样器类型及采样方法的影响。在实际测量过程中，受河床条件、采样器尺寸、采样时间等因素的影响，效率为 1 的采样器不可能存在。此外，对于山区河流，由于水流条件、河床地形的复杂性，采样器的安装成本往往较高、可达性差。因此，对于流量大、沟谷陡峭的山区河流，直接测量的方法往往不具有适用性[24,35]。

声学、环境地震学等理论的发展为解决上述问题带来新思路[24−25]。山区河流推移质在输移过程中跃移质、接触质粒间的碰撞及颗粒与河床间的冲击碰撞常常会诱发所谓“声震”信号，并以声波或地表震动的形式向周围介质传播，其通常可由不同类型的传感器，如地震仪（seismometer）、地震检波器（geophone）、加速度仪（accelerometer）、麦克风（microphone）、水声器（hydrophone）[25,36−38]等捕捉到，可用于监测推移质输移特征参数[35,39]。这种间接测量方法的优势在于其可以连续、长期且精确地记录推移质在输移过程中的声震信号特征。推移质所诱导的声震信号往往在时频域上有特定的性质，通过对信号进行解译分析，可为其输沙参数反演提供科学数据[39]。各国学者逐渐发展出以信号脉冲、振幅、特征频率与功率谱密度为关键指标参数的推移质输沙率计算方法[35]。

研究表明，推移质输移诱导的地震信号主要为高频信号（>1 Hz），基于地震检波器或加速度仪的被动测量系统及基于水声器的推移质测量系统展示出更高频（10^2～10^5 Hz）的信号特征，该类信号成分极其复杂且在传播过程中衰减迅速，但包含推移质数量、动量等重要信息。因此，通过对信号震源机制分析、信号成分解译，可以实现对推移质输移通量的反演计算。当前的理论框架表明，基于高频声震信号监测推移质输移过程需要着重考虑以下几个方面：震源空间位置、推移质颗粒冲击作用力源、推移质颗粒的冲击碰撞率、各分量速度格林函数。尽管大量学者在模型上作出许多重要贡献，但目前仍缺乏系统的理论解析其激发的精细物理过程。

研究山区河流推移质声震信号特征、推移质高频信号震源机制、推移质信号解译与参数反演算法等内容，并建立推移质输移特征参数与信号特征间的量化关系，是获得推移质精确动态输沙率的关键。本文系统论述以上内容，不仅能为研究推移质输移机理提供连续、动态、高精度的数据，还可以服务于山洪泥石流防灾减灾及山区重大工程运营与维护。

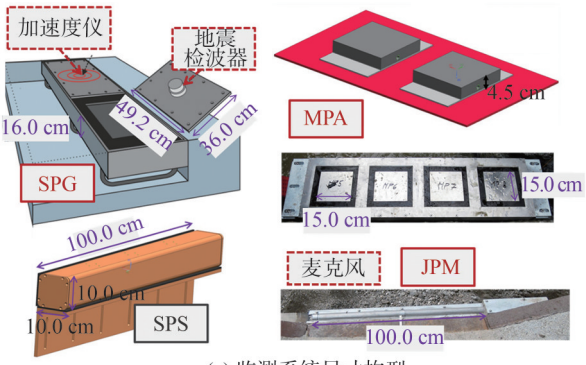
1 山区河流推移质声震监测系统

1.1 被动测量系统

推移质碰撞、输移过程所产生的声震能量一部分以固体波形式沿河床、河岸等岩土介质传播，另一部分以纵波形式在流体介质中传播。部分学者以此为基础，建立以各种传感元件为信号载体的推移质被动测量系统。典型推移质声震监测系统包括：冲击板式监测系统[40]，如瑞士冲击板式地震检波器系统（Swiss plate geophone，SPG）[41−44]、微型冲击板加速度仪系统（mini-plate accelerometer，MPA）[39]、麦克风相阵系统（phased microphone array，PMA）等[45]；冲击管/柱式监测系统，如日本麦克风管系统（Japanese pipe microphone，JPM）[46−48]、矩形管系统（square pipe system，SPS）[39]、冲击柱式系统（cylinder impact system，CIS）等[49]；水声器系统[50−52]；宽频地震仪系统[53−56]。

1.1.1 冲击板式监测系统

冲击板式监测系统（图 1）布置于河床上，用于监测推移质输移过程中颗粒直接对河床或传感板所产生的冲击震动信号，并由此计算推移质输移特征[56−58]。在消除河流湍流等噪声干扰的前提下，通过建立推移质特征参数与检波器信号的量化标定关系，最终实现推移质输沙量、粒径级配、输移速度等特征的识别。相比于其他类型的监测系统，其优点在于可以减小传播介质变化带来的显著误差，是发展最早、输沙监测精度最高的系统之一。其中，最具代表性的是 SPG 系统。该系统在瑞士阿尔卑斯山区连续监测推移质输移的时间超过 30 a，获得良好、稳定的结果[35]。



(a) 监测系统尺寸构型



(b) 监测系统应用照片

图 1　冲击板/管式推移质声震监测系统[39]

Fig. 1　Acoustic impact plate or pipe bedload monitoring systems[39]

1.1.2　冲击管/柱式监测系统

经典的冲击管式推移质监测系统有 JPM 系统[46]与 SPS 系统（图 1）[39]，其形态常为“I”形，横卧于河床上。JPM 系统工作原理是记录推移质颗粒冲击产生的系统内气压振动，并将之传递到麦克风震膜上，发生动力响应的震膜进一步促使动圈麦头往复切割磁场，最终形成电流、电压并输出。SPS 系统同时利用管道振动与声传播技术，监测推移质冲击激励过程中监测管的声压信号与加速度信号。因此，最终通过分析电流、电压强度，可与推移质粒径甚至输沙率建立相关性。

除了上述横卧于河床上的冲击管式推移质系统，冲击柱式监测系统 CIS[49]也被尝试用于解决密集型推移质输移过程中细小粒径的识别。在系统内安装动态压力传感器及加速度传感器，用以捕捉推移质颗粒运动过程中的力信号与加速度信号，并结合颗粒流场分析获得推移质粒径特征。

1.1.3　水声器系统

基于水声器构建的推移质监测系统安放于水体中，如图 2 所示。图 2 中，H 为水深，R 为传感器与声源的距离，θ 为信号路径与垂直方向的夹角，u 为推移质的输移速度。传统做法是通过标量水听器或声压水听器探测河底推移质输移过程所激发的水下声压及湍流噪声信号波动，并输出与声压成比例的电压信号。其基本假定是水声器所记录的声压信号即为推移质激发的噪声与湍流噪声的总和[59]，通过考虑声源与传输损耗函数，监测推移质输移过程特征。

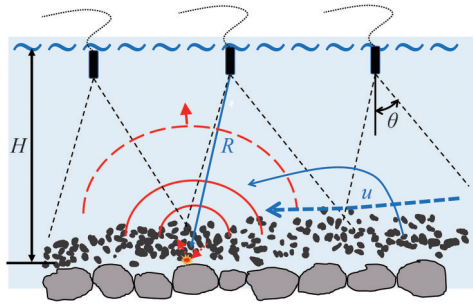


图 2　基于水声器的推移质监测系统

Fig. 2　Bedload monitoring system based on hydrophones

1.1.4　地震仪系统

基于宽频节点地震仪所建立的监测推移质系统可监测记录河流推移质运动所诱发的地震信号，并通过模型反演得到推移质输沙相关参数[53,55]。模型中主要考虑推移质颗粒冲击力源与场速度/场位移的格林函数。Govi 等[60]于 1993 年首次在野外基于地震信号监测了推移质输移的强度。Tsai 等[61]基于环境地震学理论建立了基于节点地震仪系统的推移质地震动信号监测模型，计算了推移质随机冲击作用下产生的瑞利波功率谱密度（power spectral density，PSD），并结合推移质对河床的随机冲击频率、冲击速度、粒径等物理量，构建功率谱密度与推移质输沙率的相关性。针对上述随机冲击模型，Gimbert 等[54]通过推移质水槽模型试验进行了验证，结果表明，该模型对于刚度较大的颗粒的冲击作用具有适用性，其原因是冲击能量效应大于频率效应的影响[62]，因而无法反映高频信号特性。

进一步地，Piantini 等[63]以节点地震仪密集台阵形式构造监测系统并获得了推移质输沙带分布特征；Antoniazza 等[64]基于所布置的地震仪台网研究了小流域泥沙输移规律。

1.1.5　智能粒子

智能粒子又称智能卵石/岩块（smart pebble/stone），是另一种推移质被动测量技术。不同于上述监测系统，智能粒子本身形态类似于推移质颗粒，常固定于河床上或随水流输移，因而可分为固定型和运动型两类。前者利用嵌入智能粒子中的加速度仪记录推移质碰撞所产生的高频震动信号，通过信号特征分析，监测颗粒尺度下的推移质冲击物理力学参数，如碰撞率、冲击速度等，进一步建立起推移质输沙率与震动信号响应之间的量化函数模型[54]；后者通过内置陀螺仪、加速度计、地磁场传感器采集数据，利用姿态解算算法复现推移质速度、位移、加速度状态[65]，最终获得推移质颗粒运动轨迹信息。目前，该技术的主要挑战在于复杂流场环境下的数据传输及高效、高精度解算算法的构建。

1.2 主动测量系统

声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler,ADCP)也已成功应用于推移质输沙监测中[66],成为推移质主动测量系统之一。通常使用船载ADCP系统主动向水体中发射脉冲声波,该声波在水体中传播过程中被悬移质等颗粒散射,最终被推移质层反射。因此,ADCP系统通过分析回波信号判识推移质形状、粒径等重要信息。此外,回波信号中还带有由运动物体造成的频率偏移,因此,通过分析多普勒频移效应还可以获得推移质的输移速率,最终达到监测推移质输沙通量的目的。为进一步提高效率与精度,采用多波束声纳技术同时发射多个不同方向的超声波束,通过分析回波信号,亦可快速获取河底沙波形态、推移质位置等信息。

综上,当前对于山区河流推移质输移测量装置或监测系统的研究汇总如图3所示,各测量技术优缺点见表1。

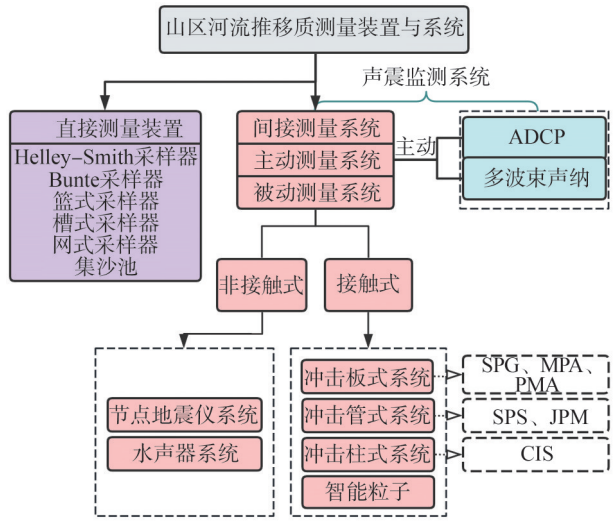


图3 山区河流推移质输移采样装置与监测系统

Fig. 3 Physical samplers and monitoring systems for bed-load transport in mountain rivers

表1 推移质各测量技术优缺点对比

Tab. 1 Comparison between various bedload measurement technologies

观测方式	发展时间	技术优点	技术缺点	采样频率/Hz	粒径范围/mm
直接采样	20世纪初	直观、可用于标定校核	效率低、安装成本高、可达性差、不连续	$<10^{-1}$	10^{-1}～10^{2}
ADCP系统	20世纪末至21世纪初	可连续监测、代价小、精度高	抗干扰性差	10^{6}	10^{-1}～10^{1}
多波束声纳系统	20世纪下半叶至21世纪初	可连续监测、代价小	抗干扰性差	10^{4}～10^{5}	
宽频节点地震仪	20世纪末至21世纪初	节点连续监测、易布设、性价比高	信号滤噪难度大、精度较低	10^{1}～10^{2}	约10^{2}
水声器系统	20世纪下半叶至21世纪初	可连续监测、代价小、精度较高	抗干扰性差	10^{2}～10^{5}	10^{0}～10^{1}
冲击板式监测系统	20世纪下半叶至21世纪初	断面连续监测、抗干扰性强、精度高	安装成本较高、算力需求大	10^{4}	10^{0}～10^{2}
冲击管式监测系统	21世纪初	断面连续监测、抗干扰性强、精度高	安装成本较高、算力需求大	10^{4}	10^{0}～10^{2}
冲击柱式监测系统	21世纪初	节点连续监测、抗干扰性强	安装成本较高、算力需求大	10^{3}	10^{0}～10^{2}
智能粒子	21世纪初	可连续监测、代价小	数据传输难度大、累计误差大	10^{2}	

注:粒径监测范围为实测或实验室测定结果,下限精度与测量技术本身相关,测量上限可能会更高。

2 山区河流推移质输移声震信号特征

影响监测信号的因素繁多,也可认为信号中包含了推移质重要信息。因此,建立声震信号与推移质特征的标定关系是系统成功应用的关键。总体而言,现阶段主要用于推移质特征判识的信号参数有信号包络、信号脉冲、振幅、频率及功率谱密度。其中:信号包络、脉冲分布与振幅能级计算相对简单,适用于针对长时间监测数据的大规模计算;而信号特征频率与功率谱密度计算相对复杂,且涉及接触、碰撞与信号传播的物理过程机制,适用于模型参数较清晰的情况。各个监测系统主要使用的信号特征参量见表2。

表2 各监测系统主要使用的信号特征参量

Tab. 2 Characteristic signal parameters used for different monitoring systems

监测系统	信号包络	信号脉冲	振幅	频率	功率谱密度
ADCP系统				√	
多波束声纳系统				√	
智能粒子			√	√	
节点地震仪系统			√	√	√
水声器系统			√	√	√
冲击式监测系统	√	√	√	√	

2.1 信号包络

推移质监测系统的波动响应过程可被系统传感元件侦测并记录,该信号携带了推移质基本特征信息。以冲击板式监测系统信号为例,除背景噪声外,有效的监测信号可认为由各个独立的推移质冲击信号

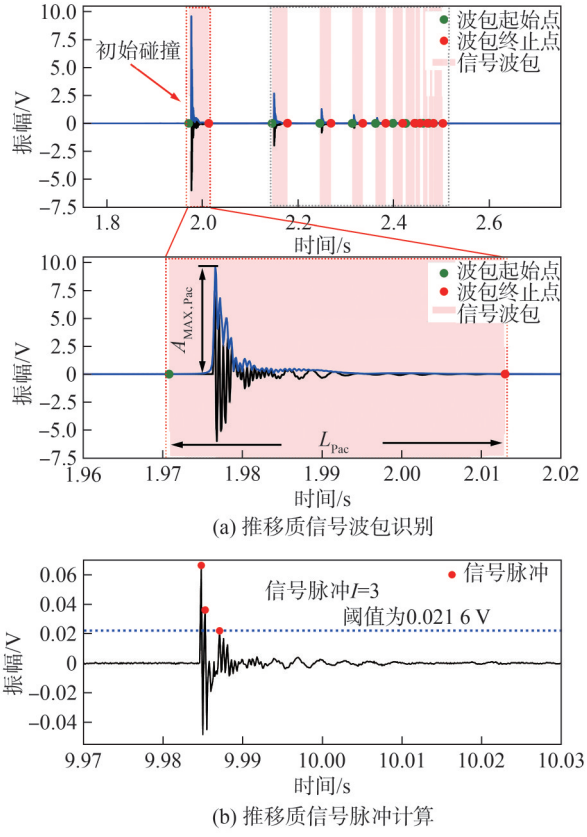
组成。为精确分析原始监测信号，如何确定各个冲击事件成为关键技术问题。本文对推移质信号进行Hilbert变换，并结合系统阈值，使得输入的推移质信号分解形成各自独立的“波包”。

对实信号$s(t)$进行Hilbert变换，记为$\hat{S}(t)=H[s(t)]$。其中，Hilbert变换过程$H[s(t)]$实际上是对输入实信号$s(t)$与$h(t)=1/\pi t$进行卷积运算“*”：

$$\hat{s}(t)=s(t)*\frac{1}{\pi t}=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{s(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中，$s(t)$为输入时域波形信号，$\hat{s}(t)$为$s(t)$的Hilbert变换信号，t为时间，τ为积分虚变量。

图4为推移质颗粒冲击SPG系统所诱发的震动信号的计算过程。图4中，$A_{\mathrm{max,Pac}}$为信号波包峰值振幅，L_{Pac}为信号波包持续时间。图4(a)为粒径为82 mm的推移质颗粒冲击SPG监测系统所记录的一次完整信号响应及信号波包(packet)的计算结果(蓝色实线)。由图4(a)可知，信号响应的有效时间大约为40 ms。图4(b)为更小粒径(20 mm)推移质颗粒所诱发的信号脉冲(impulses)的计算过程。综上可知，可以建立信号波包特征与推移质动力冲击特征的相关性，并以此识别推移质颗粒对河床的随机冲击事件。



(a) 推移质信号波包识别

(b) 推移质信号脉冲计算

图4　推移质冲击SPG系统信号计算过程[44]

Fig. 4　Signal processing of the SPG vibrations following a bedload impact[44]

2.2　信号脉冲

对震动信号进行恰当的处理可用于识别推移质输沙量，除了利用上述波包分析手段确定颗粒冲击之外，还可对信号脉冲响应进行幅值统计。本文采用部分峰值计算法对振动信号的正振幅波峰进行统计计算，并将每一次超越阈值的振荡定义为一次“脉冲”，最终可获得幅值分布。研究表明，推移质所引发的监测系统震动信号脉冲数I正比于推移质总输沙量M_{tot}。Wyss等[67]结合大量模型试验结果给出了推移质输沙量与信号脉冲响应的相关性系数，称为脉冲质量系数，并指出该系数值对山区河流类型具有依赖性。

$$I=k_{\mathrm{b}}M_{\mathrm{tot}} \tag{2}$$

式中，k_{b}为脉冲质量系数。

由此，将k_{b}作为一个指标，研究推移质粒径对系数k_{b}的影响[35,67]。则对于某一粒径分组j，$k_{\mathrm{b},j}$可表达为：

$$k_{\mathrm{b},j}=\frac{I_{\mathrm{f},j}}{M_{\mathrm{f},j}} \tag{3}$$

式中，$I_{\mathrm{f},j}$为粒径分组j的推移质颗粒所激发的SPG系统冲击脉冲，$M_{\mathrm{f},j}$为其对应的推移质质量。

事实上，可以观察到$k_{\mathrm{b},j}$是一个良好定义的指标，其代表了两种“量”，即监测信号的脉冲量与推移质输沙量(质量)之比，量纲为M^{-1}。因此，该参数可以用于实现从监测震动信号到推移质输沙率之间的转换，且能考虑到推移质粒径分组的相关效应。此外，为了考量单个推移质颗粒信号特征，Chen等[44]定义指标推移质颗粒脉冲质量系数k_{IPM}如下：

$$k_{\mathrm{IPM}}=\frac{1}{n_0}\sum_{i=1}^{n_0}\frac{I_i}{M_i} \tag{4}$$

式中，I_i为试验i在系统中所记录的单个推移质颗粒的单次冲击所形成的信号脉冲，M_i为对应的颗粒质量，n_0为试验次数。

2.3　振幅分布

研究表明，信号脉冲分布与振幅能级取决于推移质颗粒的粒径级配[68]。利用振幅直方图(amplitude histogram，AH)方法[42]，可从监测信号中提取推移质粒径分组等关键信息。AH方法主要包括两类，即IbAH和PbAH，分别基于原始脉冲信号及波包特征。Wyss等[67]进一步建立了振幅(能级)与推移质粒径的幂指数关系，并通过所构建的模型反演了推移质分组粒径：

$$A_{\mathrm{Max,Pac}}=\alpha D^{\beta} \tag{5}$$

式中：D为推移质粒径；α与β为两个经验参数，由试验或野外监测数据获得。

尽管振幅模型在经过校正后成功应用于野外，但

标定系数受到诸多因素影响，特别是河流流速及颗粒碰撞速度、输移模式等。

2.4 特征频率

弹性波动理论与物理试验均表明推移质颗粒粒径与其激发信号的频率之间具有相关性[24,42]。一般来讲，设在河道附近监测台站所记录的推移质震动信号主要为高频信号（>1 Hz），而震源（激发源）附近的信号往往能达到数百至数千Hz不等。Thorne[52]基于冲击碰撞理论，给出了推移质颗粒在运动过程中相互碰撞所产生的噪声信号（sediment generated noise，SGN）频率的理论解答；该理论解表明信号的特征中心频率与推移质粒径呈现1阶反比函数关系，且信号峰值频率f_{peak}大约为特征频率f_{o}的1.7倍，即$f_{\text{peak}}=1.7f_{\text{o}}$，其中，$f_{\text{o}}=1/2t_{\text{o}}$，中间参数$t_{\text{o}}$的计算如式（6）所示：

$$t_{\text{o}}=4.53\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{1-\upsilon_1^2}{E_1}+\frac{1-\upsilon_2^2}{E_2}\right)\right]^{0.4}\cdot\left(\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}\right)^{0.4}\cdot\left(\frac{1}{U_{\text{I}}}\cdot\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)^{0.2}\tag{6}$$

式中，E_1和E_2为两个推移质颗粒的弹性模量，υ_1和υ_2为推移质颗粒的泊松比，m_1和m_2为两个推移质颗粒的质量，R_1与R_2为两个颗粒的接触曲率半径，U_{I}为碰撞速度。

该模型涵括了推移质颗粒力学材料特性、粒径及碰撞速度等复杂影响因素。考虑到式（6）计算的复杂性，假定推移质颗粒的特性相同，则峰值频率f_{peak}可以进一步简化为：

$$f_{\text{peak}}=0.15\left[\frac{E}{\rho_{\text{s}}\left(1-\upsilon^2\right)}\right]^{0.4}\cdot\frac{U_{\text{I}}^{0.2}}{R}\tag{7}$$

式中，E为推移质颗粒的弹性模量，υ为泊松比，ρ_{s}为推移质颗粒的密度，R为推移质颗粒半径。

基于上述理论，Rickenmann[24]在对推移质粒径D的监测识别研究中，还计算了推移质冲击SPG系统所激发的震动信号的重心频率f_{C}[67]，如式（8）所示；并将野外台站Erlenbach山区河流推移质监测结果与式（9）进行了定量比较，获得了有意义的结果。

$$f_{\text{C}}=\frac{\sum f_{m,i}A_{m,i}^{\text{FFT}}}{\sum A_{m,i}^{\text{FFT}}}\tag{8}$$

$$f_{\text{C}}=162\frac{U_{\text{I}}^{0.2}}{D}\tag{9}$$

式（8）、（9）中：$f_{m,i}$为SPG信号频谱中某点的频率，Hz；$A_{m,i}^{\text{FFT}}$为快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）后该频率$f_{m,i}$所对应的幅值，V·s；指标i为试验序号或者计算节点编号。

2.5 功率谱密度

信号功率谱密度是另一个从相对复杂角度描述推移质输移特征的重要指标。所监测到的推移质声震信号一般以电压信号形式$s(t)$记录。功率谱密度PSD的定义式为$P(f)=\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{T}\left|S(f)\right|^2$，其中，$S(f)$为信号$s(t)$傅里叶变换后的结果，$f$表示频率，$T$为信号截取时长。在物理机制层面，功率谱密度模型建立的关键在于解析推移质震源及构造格林函数，前者结合推移质对河床的冲击模型而给定，后者表达了声震信号与震源之间的传播介质（如河床岩土介质或水体等）特征。

2.5.1 推移质水声信号功率谱密度

考虑计算放置于某坐标矢量$\boldsymbol{x}$处水声信号功率谱$p_x(f,\boldsymbol{x})$，其表达可以写为：

$$p_x(f,\boldsymbol{x})=\sum_{i=1}^{N_X}\sum_{j=1}^{N_Y}s_{\text{I}}\left(f,\boldsymbol{x}_{ij}\right)T_{\text{L}}\left(f,\boldsymbol{x};\boldsymbol{x}_{ij}\right)\tag{10}$$

式中，N_X与N_Y分别为河流断面方向及流动方向的计算网格数，$s_{\text{I}}(f,\boldsymbol{x}_{ij})$为所有坐标$\boldsymbol{x}_{ij}$处声源对于单位空间距离（1 m）内所产生的功率谱值，$T_{\text{L}}(f,\boldsymbol{x};\boldsymbol{x}_{ij})$为信号从声源到水声器传播过程中的传输损耗函数（transmission loss function）。进一步地，在模型中考虑推移质运动特征参数及不同的传播模型，以实现推移质输沙参数反演。

2.5.2 随机冲击作用下的震动信号功率谱密度

推移质颗粒随机冲击作用所产生的信号总功率谱密度可按下式计算[61]：

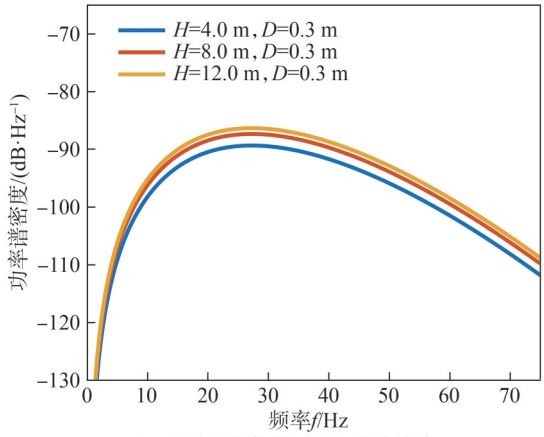
$$P^{\text{T}}(f)=\int_D\frac{n}{t_i}\cdot\frac{\pi^2f^3m^3w_i^2}{\rho_{\text{s}}^2v_{\text{c}}^2v_{\text{u}}^2}\chi(\beta')\text{d}D\tag{11}$$

式中：$P^{\text{T}}(f)$为河流推移质产生的总功率谱密度；n为某粒径D下的推移质数量；t_i为相邻两次随机冲击信号的平均时间间隔；m为单个推移质颗粒的质量，$m=\rho_{\text{s}}V_{\text{p}}$，$V_{\text{p}}$为颗粒体积；$w_i$为单颗粒推移质瞬时竖向冲击速度；$v_{\text{c}}$为瑞利波相速度；$v_{\text{u}}$为群速度；$\chi$为无量纲参数$\beta'$的函数。

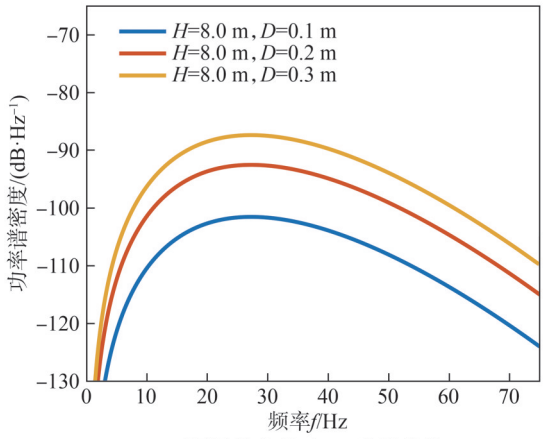
式（11）中，积分第1项（n/t_i）代表单宽推移质颗粒冲击率，该值与河流宽度W、水深H、推移质颗粒输移与沉降速度、床面剪应力等因素相关。图5为在相同河流宽度（W = 150 m）、不同水深（H = 4.0、8.0、12.0 m）及不同粒径（D = 0.1、0.2、0.3 m）条件下，推移质随机冲击功率谱密度PSD的计算值。

2.5.3 高频密集作用下的震动信号功率谱密度

基于上述模型，在推移质颗粒高频密集冲击作用机制下，信号功率谱密度函数可表达为式（12）：模型假设推移质输移过程中颗粒碰撞所辐射出的总能量等于细观上各剪切层颗粒碰撞辐射能量之和，重点考



(a) 不同水深条件下PSD的计算值



(b) 不同粒径条件下PSD的计算值

图5　不同水深与粒径条件下推移质功率谱密度 PSD 模型计算值

Fig. 5　Calculated values of the PSD model for bedload transport with different water depths and grain sizes

虑密集冲击作用下碰撞力或应力计算及碰撞率模型[62,69]。

$$P_{u_r}(f)=\int_V N_{\mathrm{Tot}}(\boldsymbol{x})\cdot\left|\bar{\boldsymbol{F}}_I(\boldsymbol{x},f)\bar{\boldsymbol{G}}(f,\boldsymbol{r};\boldsymbol{x})\right|^2\mathrm{d}V \quad (12)$$

式中，$P_{u_r}(f)$为推移质激发信号在频域上的总功率谱密度，$N_{\mathrm{Tot}}(\boldsymbol{x})$为颗粒总冲击频率，$\bar{\boldsymbol{F}}_I(\boldsymbol{x},f)$及$\bar{\boldsymbol{G}}(f,\boldsymbol{r};\boldsymbol{x})$分别为频域上的颗粒碰撞力及速度格林函数，$\boldsymbol{r}$为坐标矢量，$V$为积分域。

3　山区河流推移质输移声震信号解译

3.1　推移质信号震源空间定位

3.1.1　基于到时法的推移质震源初步定位

山区河流推移质在输移过程中具有异常复杂的空间分布特征，监测信号多源激发并耦合，给输沙率解译工作带来极大挑战。Turowski 等[70]指出推移质颗粒冲击位置的异变性是导致原位标定与实验室标定函数呈现出显著差异的重要因素。因此，通过监测信号实现推移质震源定位可推演空间分布特征，是开展断面输沙率反演的必要条件。

基于地震学理论，通过计算监测系统信号的到时差异，可实现推移质震源的初步定位[63]。计算过程关注研究区计算网格节点坐标(x, y)处推移质冲击所激发信号的时间延迟，该时间延迟与地震波相速度c_{seis}相关。通过迭代搜索节点空间坐标与相速度，实现模型预测的时间延迟与所监测信号时间延迟之间的误差达到极小值，如式(13)所示，由此最终给出推移质震源位置。

$$M\left(i,j,c_{\mathrm{seis}}\right)=\frac{1}{c_N^2}\left(\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j>i}^{N}\left(\Delta t_{i,j}^{\mathrm{O}}-\Delta t_{i,j}^{\mathrm{P}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中，c_N^2为概率组合数，M为预测到时差$\Delta t_{i,j}^{\mathrm{P}}$与实测到时差$\Delta t_{i,j}^{\mathrm{O}}$之间的差异，$i$与$j$为网格坐标节点标号，$N$为地震仪数量。

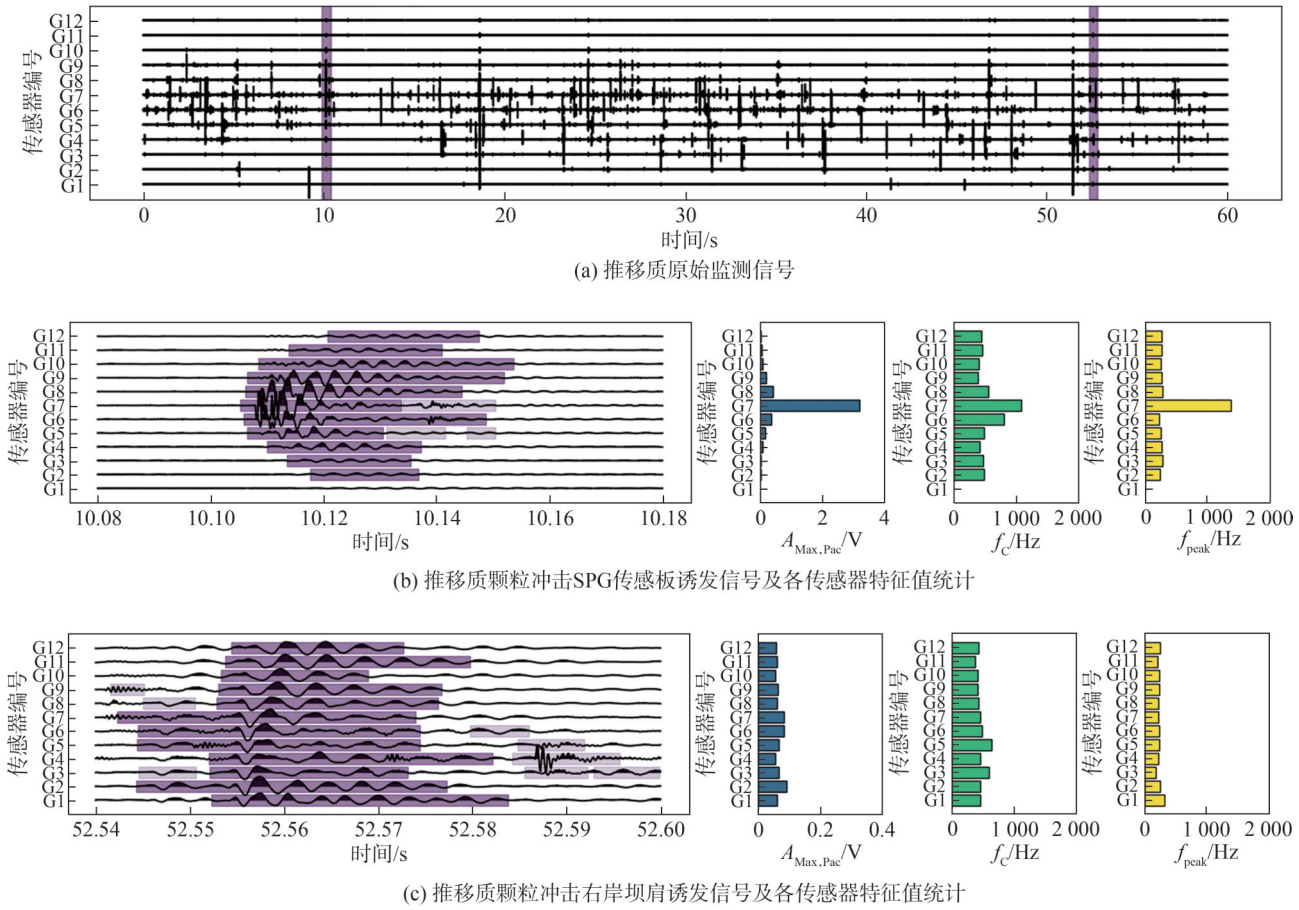
3.1.2　基于数值滤波器的空间定位技术

在利用冲击板式推移质监测系统(SPG 及 MPA 等)监测推移质输沙的过程中，监测数据显示推移质输沙带在断面上有极大的非均匀性。Nicollier 等[43]报道了瑞士 Navisence 山区河流推移质监测结果，数据显示推移质输沙带主要集中在河流中部位置，但所有监测系统均检测到推移质动力冲击作用所产生的震动信号。这类非均匀性的推移质冲击作用所产生的视在信号波包(apparent signal packet)的电压振幅可达 3.2 V，使得反演输沙量有所偏差。所谓“视在”，即参数覆盖区间，这里特指波动传播范围。视在信号为推移质颗粒冲击作用在$G(i)(i=1,2,\cdots,i)$传感板由信号传播影响范围内的检波器$G(j)(j=1,2,\cdots,j\neq i)$所记录到的信号，其物理意义可以被认为是由波动传播所造成的噪声信号。

为提高输沙参数的反演精度，Nicollier 等[43]构建了基于信号特征频率与振幅的数值滤波器，用于区分真实波包与视在波包，以此消除波动传播所带来的推移质监测误差。

图 6 为 Navisence 台站断面输沙信号，信号特征，如峰值振幅($A_{\mathrm{Max,Pac}}$)、重心频率(f_{C})及峰值频率(f_{peak})分别以蓝色、绿色及黄色进行标注。Chen 等[71]进一步在大小两种输沙粒径条件下检验了“频率–振幅”滤波器的有效性和精度，结果显示，相比于大粒径，推移质“频率–振幅”滤波器对于小粒径推移质输移过程的滤波效果不显著，后者几乎所有信号波包均为真实波包。究其原因，小粒径颗粒冲击能量小，波动在传播过程中发生衰减不能被相邻检波器检测到而激发视在信号波包；与之相比，大粒径推移质颗粒在相同条件下冲击能量大，容易激发视在波包。此外，从方法本身

可以看出，其对推移质空间位置的监测精度还受限于监测系统尺寸及波动传播介质。



(a) 推移质原始监测信号

(b) 推移质颗粒冲击SPG传感板诱发信号及各传感器特征值统计

(c) 推移质颗粒冲击右岸坝肩诱发信号及各传感器特征值统计

图6 瑞士Navisence山区河流推移质监测信号[43]

Fig.6 Bedload generated signals at the Navisence site in Switzerland[43]

3.1.3 基于波束形成的空间定位技术

上述滤波方法已经较大程度提高了推移质断面分布监测精度。然而，研究表明，仅在传感板上的偏心冲击作用所造成的信号振幅差异也高达50%，这给推移质粒径及分组输沙精细化监测带来相当程度的挑战。基于此，Chen等[45]报道了一种基于麦克风相阵与加速度仪的推移质监测系统PMA及其理论模型。基于波束形成技术，通过对监测信号进行反演计算，实现了推移质冲击波声源图像重构，进而实现了对推移质颗粒空间位置的识别，定位精度可达厘米级。并以此校正了系统偏心误差，显著提升了粒径反演精度。

3.2 震源物理模型

如前所述，目前关于推移质震动信号功率谱密度模型的研究集中于讨论冲击作用力源特征与场速度/场位移的格林函数特征。

在上述框架下，许多学者针对推移质颗粒冲击力模型开展理论与试验研究。Tsai等[61]认为推移质颗粒对河床的冲击力可近似为一个瞬时脉冲力，因此可以用狄拉克广义函数或分布来描述。Kean等[72]通过原位监测数据，利用局部流深、密度及河床坡度给出了泥沙对床面所施加的平均应力。Lai[73]与Farin[74]等指出大颗粒的冲击碰撞作用是诱发地震信号的主导因素。进一步地，Bachelet[75]与Chen[44]等分别通过赫兹接触理论、弹塑性理论及有限元方法研究了推移质颗粒冲击力–时间曲线特征，并分析了地震检波器系统在推移质冲击荷载作用下的信号响应。Zhang等[76]通过构造基底脉动力（波动力）的力学链模型，初步解释了山洪泥石流产生高频信号的物理机制。推移质输移过程主要诱发高频面波信号，其传播过程衰减快且对河床岩土介质材料的不均匀性高度敏感。

目前的模型在描述推移质高频地震信号激发上仍然存在较大挑战。其中，一个主导因素是推移质颗粒间的碰撞机制不明确，使得颗粒碰撞率计算偏差较大。传统的颗粒碰撞率由随机过程模型确定，其核心参数为相邻随机冲击事件的时间间隔。Farin等[74]进一步考虑颗粒浓度及颗粒脉动速度模型，给出了

新的碰撞率计算模型。基于颗粒层间剪切运动特性，Arran 等[62]采用剪应变率等参数初步估计了惯性颗粒流的碰撞率。基于非平衡热动力学原理，Chen 等[69]建立了非均匀密集颗粒流中粒子碰撞率的解析模型，为理解颗粒流产生高频震动信号的物理机制提供新视角。

尽管学者们不断修正推移质声震信号监测模型，但由于山区河流推移质自身具备独特的运动特性和空间分布（输沙带），且其冲击河床的动力机理相当复杂，一些特征在模型上还未被精确考虑；加之传播介质、信号衰减、运移模式等影响因素，使得对宽级配推移质分组输沙的监测尤其不够理想，这些都需要进一步研究。

3.3　传播与衰减模型

目前，对推移质高频信号传播过程的研究主要针对面波格林函数构造，具体涉及瑞利波及勒夫波的模拟，相关模型已趋成熟。在利用地震检波器系统监测推移质输移的过程中，Antoniazza 等[57]发现推移质冲击位置会给系统信号响应带来偏差，这是由波动能量在系统间传播所引起的。Nicollier 等[43]基于不同地震检波器系统监测数据发现，波传播并衰减可造成粒径约 18 cm 的尺度误差。Chen 等[44]进一步基于冲击模型试验指出，推移质信号振幅与频率在介质中的衰减均能达到 50%。声震能量的衰减通常用品质因子 Q_u 来量化，Q_u 随材料密度和材料中波度的增大而增大。Ammon 等[77]将震动波的振幅衰减 $A(r)$ 描述为传播距离 r 的函数：

$$A(r)=A_0 e^{-\frac{f\pi r}{cQ_u}} \tag{14}$$

式中，A_0 为初始振幅，c 为波速。

式（14）描述了震动信号在传播过程中随传播距离的指数衰减关系。显然，波动传播距离越长，其衰减程度越大；同时，式（14）也说明高频信号相较于低频信号衰减更为显著。此外，考虑到在不同传播介质中的波速差异，推移质颗粒所激发的震动信号在冲击式监测系统（金属材料）中的衰减较信号在河床介质（岩土材料）中慢。这种衰减性质的差异性是进行推移质空间位置判断的基础。

对于密集颗粒流输移过程所诱发的高频信号，其衰减过程更为复杂。Bachelet 等[75]指出，受颗粒层间相互作用、颗粒围压、体积分数等因素的影响，层间衰减因子异变性大，精确测定其值存在困难。Chen 等[69]进一步提出了密集流颗粒碰撞率的分布模型，并指出层间高频碰撞辐射声功率的衰减因子与颗粒材料的热力学参数相关。

至于以水声器为基础构建的推移质监测系统，其通常以水声信号传输损耗函数来考虑推移质声源到传感器传播过程中的信号功率衰减问题[59]。而基于麦克风传声器的推移质监测系统，声压衰减模型通过构建空气动力学方程，与信号频率、声速、信号传播距离等相关[45]。因此，相较于节点地震仪系统或水声系统，冲击式监测系统对河流环境适应性更好，但安装代价相对较大。

3.4　湍流噪声处理

实际中监测信号是极其复杂的，不仅包含推移质信号，还包含湍流噪声或悬移质噪声，因此有效消除湍流噪声信号有助于推移质输沙监测精度的提升。

对于冲击式监测系统，以 SPG 系统为例，大量的试验及原位观测结果表明，河流湍流噪声最大能激发系统 0.01 V 的噪声信号，而系统噪声比湍流噪声量级更小。因此，在系统中常通过阈值设定消除噪声信号，保留有效推移质信号。不同的监测系统对湍流噪声的敏感性不同，可以通过大量标定试验确定不同系统的阈值。

对于利用节点地震仪、水声器等的推移质声震监测技术而言，湍流引起的噪声频率比推移质所诱导的信号频率更低[78]。此外，湍流对河床作用力的频谱特征相较于推移质对河床作用力也存在差异显著。因此，可以利用布置在河流不同距离处的传感器对湍流过程和推移质过程进行独立标定和区分，最终在模型中消除信号中的湍流成分，提升推移质通量反演效果。

3.5　推移质输沙参数反演

3.5.1　推移质组分粒径

通过构建合适的标定函数关系，可实现推移质粒径的反演计算，流程如图 7 所示。以 SPG 推移质监测系统为例，推移质激发的信号波包的最大幅值 $A_{Max,Pac}$ 随颗粒粒径的增大而呈现幂指数增大，该结论最早在 Rickenmann 等[35]的野外监测研究和 Wyss 等[67]的水槽试验中被发现，且有限元（FEM）模拟结果和试验结果吻合较好[44]，结果表明，推移质颗粒冲击速度对电压信号幅值具有正向的影响，如图 8 所示。图 8（a）的图例中，FEM 为有限元模拟数据，EXP 为试验数据，G1 与 G2 为不同传感器编号，1.1 与 2.1 为中心冲击及偏心冲击点位，V0 至 V3 为不同竖直冲击速度（0.1 至 1.5 m/s）；图 8（b）中，V_f 为流速。此外，接触理论表明，信号脉冲特征频率随粒径的增大而快速减小。因此，信号振幅、频率与脉冲响应均可成为推移质粒径测量的参数指标。

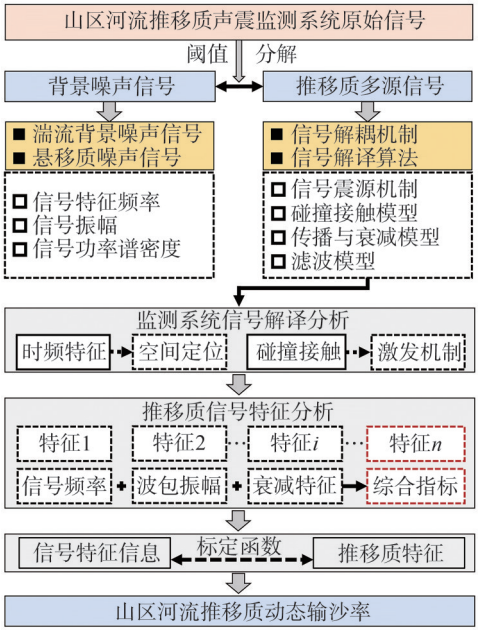
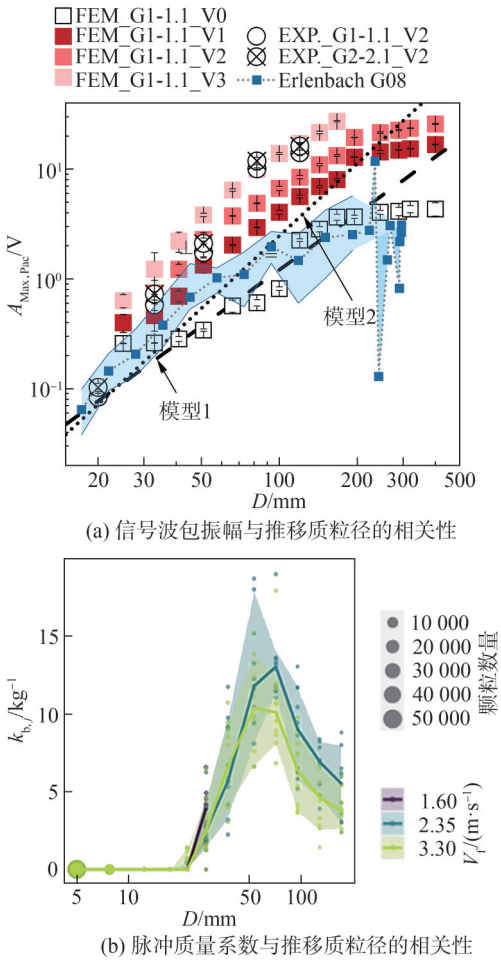


图7 推移质输沙高频声震信号解译流程

Fig. 7 Signal processing of bedload transport based on high-frequency acoustic signals



(a) 信号波包振幅与推移质粒径的相关性

(b) 脉冲质量系数与推移质粒径的相关性

图8 信号波包振幅与脉冲质量系数与推移质粒径的相关性函数[39,44]

Fig.8 Maximum amplitude of signal packet and impulses-mass coefficient as functions of bedload size[39,44]

3.5.2 输移速度

推移质在河床上的输移速度 V_P 是评估输沙率的重要参数。一般来讲，V_P 小于水流流速或者深度平均流速 V_W。V_P 与 V_W 的比值 $r_{PW}=V_P/V_W$ 已经在大量的水槽试验中被测定，Julien 等[79]给出了其经验取值范围在 0.3 至 0.8 之间。因此，如果预先给定该比率，可对推移质输移速度进行经验性估算。

此外，V_P 还可由推移质颗粒输移距离 L_P 与其相应的时间 ΔT_P 计算获得。因此，对于有大量推移质颗粒的运动过程，问题的关键转化为如何精确地获得 L_P 与 ΔT_P 这两个参数值。对于铺设有监测系统 S_1 及 S_2 的山区河流，S_2 系统处于相对下游位置，则推移质输移速度可由两套监测系统的中心距 $L_P^{S_1,S_2}$ 与监测信号的到时差 $\Delta T_P^{S_1,S_2}$ 进行计算，即满足：

$$V_P^{Cal}=\frac{L_P^{S_1,S_2}}{\Delta T_P^{S_1,S_2}} \tag{15}$$

式中：V_P^{Cal} 为推移质颗粒输移速度的计算值；信号到时差 $\Delta T_P^{S_1,S_2}=T_P^{S_2}-T_P^{S_1}$，可由监测信号的波包数值积分曲线特征值的差值进行计算[71]。

为验证计算可靠性，基于式(16)对推移质输移速度 V_P 作无量纲处理，获得基于式(15)的无量纲推移质输移速度计算值 $V_P^{Cal,*}$ 及基于流速的无量纲推移质输移速度估计值 $V_P^{Est,*}$，并与大量文献资料进行对比分析，结果如图9(a)所示。

$$V_P^{*}=\frac{V_P^{Cal}}{\sqrt{(S-1)gD}} \tag{16}$$

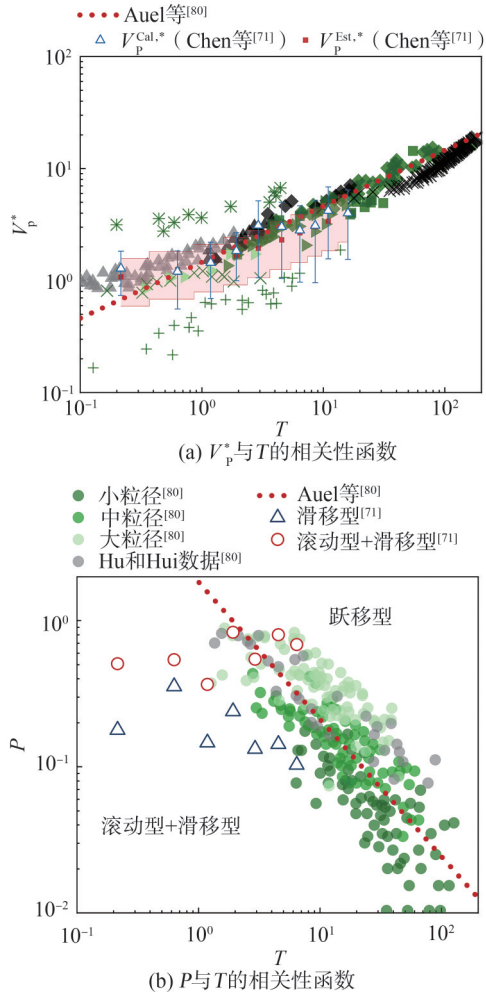
式中，V_P^* 为无量纲推移质输移速度，S 为推移质颗粒密度与水体密度之比，g 为重力加速度。

3.5.3 输移模式

值得指出的是，在不同流速或床面应力条件下，推移质输移模式可能存在相互转换，且会诱发不同特征的声震信号。根据大型水槽试验统计结果，在推移质的运动模式由滑移型向滚动型，进一步向跃移型模式过渡的过程中，监测信号响应的强度和重心频率均有较大幅度的提高[71]。基于此，通过监测信号识别并区分了推移质3种不同运动模式(跃移型、滚动型及滑移型)及其发生概率(P_{sli}、P_{rol} 及 P_{sal})。

图9(b)表达了滚动型推移质的运动模式发生概率 P_{rol} 与无量纲水力强度 T 值呈现幂指数下降的规律，并绘制了跃移型与滚动型相互转换的过渡边界。在相同的水力条件下，运动模式的变化主要来自颗粒粒径的变化。Auel 等[80]指出，在相同的 T 值条件下，大粒径推移质往往更容易出现滚动型模式。已有试验结果表明，对于 T 值比较小的情况，$P_{rol}+P_{sli}$ 小于

T值相对较大时的情况，而仅考虑P_{sli}则呈现出相反的趋势。这是由于当T值较小时，床面剪应力趋近于床沙起动应力。此外，对试验影像开展图像识别分析，结果表明，在颗粒形状较扁平的情况下，同样可能使得其以滚动模式输移的概率降低，而更易以滑移型模式进行输移。



(a) V_P^*与T的相关性函数

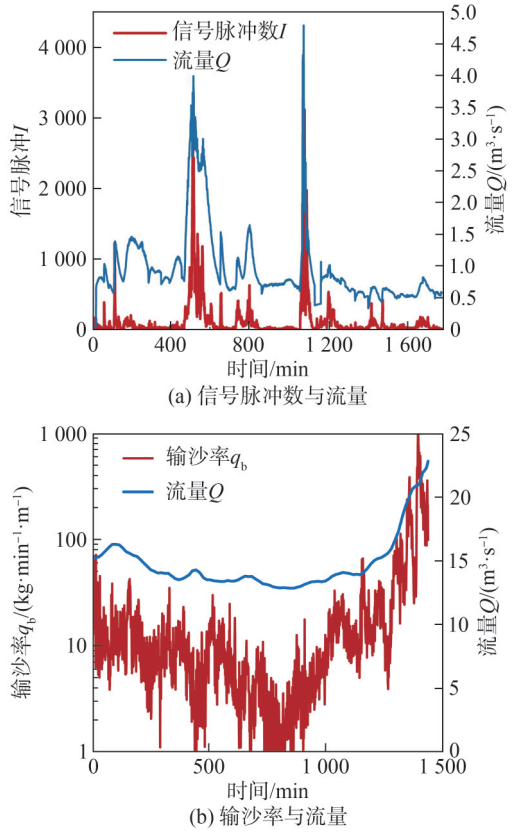
(b) P与T的相关性函数

图 9　无量纲推移质输移速度 V_P^*、输移模式概率 P 与无量纲水力强度 T 的相关性[71]

Fig. 9　Nondimensional particle velocity V_P^* and probability of transport mode P as functions of the excess transport stage T[71]

3.5.4　输沙通量

通过分析推移质所激发的声震信号特征，结合震源物理模型、标定模型，可实现对山区河流推移质输沙通量的反演与动态监测。图 10 为瑞士 Erlenbach 及 Fischbach 山区河流推移质信号脉冲及输沙率与流量的关系[49,81]。由于在非汛期内监测系统几乎无响应，因此剔除无流量时间段。由图 10 可知，监测信号脉冲或推移质输沙率在时间上的分布是不均匀的，体现了推移质输沙过程的脉动特征。结果显示，在整个汛期内，多次山洪事件所激发的数十万冲击脉冲响应与水流强度仍然具有较强的正相关性，且相关性稳定。这为长期、连续且动态地监测推移质输沙过程及测定推移质输沙率提供坚实基础。



(a) 信号脉冲数与流量

(b) 输沙率与流量

图 10　瑞士 Erlenbach 及 Fischbach 山区河流推移质信号脉冲及输沙率与流量的关系[49,81]

Fig. 10　Relationships of bedload-generated signal impulses,bedload transport rate, and flow discharge in the Swiss mountain streams Erlenbach and Fischbach[49,81]

4　讨论与展望

尽管诸多学者已经在监测技术及模型上作出巨大努力，但由于山区河流推移质自身具备独特的脉动特性，再加之受波动传播介质不均匀性、信号衰减等因素的影响，使得对推移质全断面输沙率的监测与反演仍然不够理想；声震反演模型、输沙标定模型对不同河流环境的适应性尚需讨论。此外，仍然存在监测形式单一等问题，无法精细全面记录推移质信号特征。这些因素也制约着学者们对山区河流推移质输移机理的认识。

对于冲击式监测系统，如 SPG、MPA、SPS、JPM 及 PMA 等，由于系统集成度较高且均经过减噪、滤波处理，环境因子（如湍流、河床岩土介质等）对监测效果的影响不显著，监测信号与推移质输沙率的标定关系鲁棒性强。影响标定模型的因素主要为河流流速、床面粗糙度、推移质空间分布等。为了提升推移质监测

精度以适用于不同的河流环境，有必要获取更广义的标定模型或参数。因此，已定量且大量地开展了不同河流流速、床面粗糙度等条件下标定模型的差异，以便校正所反演的推移质输沙率。最终，通过对这些影响因素的研究，可以获得不同粒径分组下更加广义的推移质–信号标定系数，显著提高分组输沙率预测的准确性，以及对不同河流环境的适应性。

相比之下，基于地震信号或水声信号的非接触式推移质监测技术而言，其基本模型框架一致。针对不同河流环境，主要差异来源于河床岩土介质参数、水流条件等。因此，当应用于不同河流环境时，可以在基本框架模型下首先开展一系列的主动源试验，以确定模型中的参数，最终提高模型效果。

目前，各监测系统、技术已独立地发展并运用在法国、瑞士、德国、意大利、奥地利、日本等国家对山区河流推移质的监测研究中，特别是冲击板式地震检波器推移质监测系统已在瑞士 Erlenbach 台站监测超 30 a，其间传感核心与信号处理技术不断进行升级换代以适应新的需求。因此，研发更新的监测系统并构建更优的模型与算法是实现推移质精细化测量的关键。以宽频节点地震仪为例，其对野外高山峡谷区域布设的场地要求较高，较难满足密集布设的需求。随着光纤技术的发展，分布式光纤声波传感（distributed acoustic sensing，DAS）作为一种受电磁干扰小、时空分辨率高的技术正逐渐被应用于对地震活动性、冰川、泥石流灾害等[82]的监测。作为宽频节点地震仪的替代方案，DAS 在推移质泥沙监测方面显示出极大的潜力和价值[83]，可满足高分辨率、大规模的监测需求。

此外，针对山区河流推移质输移监测精度不确定的难题，建议构建基于多传感元件普适性更强的声震联合监测系统，建立山区河流推移质综合监测台站并进行长期连续的原位监测。在此基础上，研究推移质泥沙复杂输移过程中声震信号精细震源机制，系统性构建各信号响应指标与输沙参数指标数据库，基于机器学习理论探索更为高效的推移质输沙率反演模型，最终可完善山区河流推移质输移监测体系、定量评估山洪、泥石流等水生灾害，以及山区水利工程建设与长期运营等方面提供科学依据。

5 结 论

本文对山区河流推移质输移高频声震信号监测研究进行了回顾和总结，详细探讨了山区河流推移质声震监测系统、监测信号特征、监测信号解译与输沙参数反演等内容，具体结论如下。

1）介绍了基于不同原理构建起来的推移质声震监测系统，包括：被动测量系统，如水声器系统、麦克风系统、冲击板式地震检波器系统、宽频地震仪密集台阵系统、智能粒子、声震联合监测系统；主动测量系统，如声学多普勒流速剖面仪、多波束声纳等；实现全方位监测并记录在不同介质中传播的推移质输移声震能量。

2）在上述基础上着重介绍了推移质输移过程中激发的声震信号特征与处理技术，分别为基于希尔伯特变换的信号波包计算、信号脉冲计数、振幅与特征频率计算，以及基于物理机制的推移质信号功率谱密度模型。

3）论述了山区河流推移质信号解译方法，介绍了 3 种不同精度的推移质空间分布定位模型，包括基于到时法的推移质震源初步定位技术、基于“振幅–频率”的数值滤波定位技术及基于波束形成原理的推移质冲击波声源反演技术；并论述了推移质输移声震信号震源物理模型及推移质信号传播过程衰减的计算模型。

4）在推移质声震信号特征、震源机制与解译方法研究的基础上，介绍了当前利用高频声震信号反演推移质输沙参数的相关进展，提出推移质特征参数如分组粒径、输移速度、运动模式、输沙通量等的计算方法。

参考文献：

[1] Wilhelm B, Rapuc W, Amann B, et al. Impact of warmer climate periods on flood hazard in the European Alps[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(2): 118–123.

[2] Badoux A, Andres N, Turowski J M. Damage costs due to bedload transport processes in Switzerland[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(2): 279–294.

[3] Wang Xiekang, Yang Po, Sun Tong, et al. Study on division early warning of flash flood disaster caused by rainstorm in mountainous small watersheds[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 29–38. [王协康, 杨坡, 孙桐, 等. 山区小流域暴雨山洪灾害分区预警研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 29–38.]

[4] Fan Jinsheng, Bai Yuchuan, Luo Qiushi, et al. Theoretical analysis on influencing factors of optimal channel form for bed load transport in alluvial rivers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 201–208. [樊金生, 白玉川, 罗秋实, 等. 冲积河流推移质输沙最优河道形态影响因素理论分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 201–208.]

[5] Zhang Hongwu, Zhang Junhua, Bu Hailei, et al. Discussion of bed-load transport equations[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 140–

145.[张红武,张俊华,卜海磊,等.试论推移质输沙率公式[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):140–145.]

[6] Tian Yongsheng, Fan Zhonghai. Summary of calculation methods of typical bed load transport rate[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2007,25(11):40–42.[田永生,范中海.典型推移质输沙率计算方法概述[J].东北水利水电,2007,25(11):40–42.]

[7] Dou Guoren. A similarity theory concerning the design of total sediment transport models with reference to a particular project[J].Hydro-Science and Engineering,1977(3):1–20.[窦国仁.全沙模型相似律及设计实例[J].水利水运科技情报,1977(3):1–20.]

[8] Yang Jurui,Fang Duo,He Wenshe,et al.Nonlinear study on transport rate of bedload[J]. Advances in Water Science, 2003,14(1):36–40.[杨具瑞,方铎,何文社,等.推移质输沙率的非线性研究[J].水科学进展,2003,14(1):36–40.]

[9] Huang Caian, Xi Bin. Unified form of bed load transport equation[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute,2000(2):72–78.[黄才安,奚斌.推移质输沙率公式的统一形式[J].水利水运科学研究,2000(2):72–78.]

[10] Cheng N. Exponential formula for bedload transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,128(10):942–946.

[11] Ackers P, White W R. Sediment transport: New approach and analysis[J].Journal of the Hydraulics Division,1973,99(11):2041–2060.

[12] Rickenmann D. Variability of bed load transport during six summers of continuous measurements in two Austrian Mountain streams(fischbach and ruetz) [J]. Water Resources Research,2018,54(1):107–131.

[13] Engelund F, Fredsøe J. A sediment transport model for straight alluvial channels[J].Hydrology Research,1976,7(5):293–306.

[14] Yalin M S. Mechanics of sediment transport[M]. Oxford: Pergamon Press,1972.

[15] Meyer–Peter E,Müller R. Formulas for bed-load transport [C].IAHSR 2nd meeting.Stockholm,1948.

[16] Gomez B,Church M. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers[J].Water Resources Research,1989,25(6):1161–1186.

[17] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[M]. Washington DC: US Government Printing Office,1966.

[18] Armanini A, Cavedon V, Righetti M. A probabilistic/deterministic approach for the prediction of the sediment transport rate[J].Advances in Water Resources,2015,81:10–18.

[19] Einstein H A. Formulas for the transportation of bed load [J].Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1942,107(1):561–577.

[20] Yu Guoan, Wang Zhaoyin, Yang Jishan, et al. Effects of incoming sediment on bed load transport in mountain streams [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2009,49(3):341–345.[余国安,王兆印,杨吉山,等.来沙条件对山区河流推移质输沙的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(3):341–345.]

[21] Hu Haiming, Li Yitian. Study on mechanism of non-unifom sediment motion and its computation method of transport rate[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1996, 11(3):284–292.[胡海明,李义天.非均匀沙的运动机理及输沙率计算方法的研究[J].水动力学研究与进展(A辑),1996,11(3):284–292.]

[22] Chen Youhua. Bed load movement theoretical model and the movement process calculation[D].Tianjing:Tianjing University,2009.[陈有华.推移质泥沙运动理论模型及运动过程计算[D].天津:天津大学,2009.]

[23] Huang Caian, Yang Chih Ted. Sediment transport and flow intensity indexes[J].Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(6):1–7.[黄才安,杨志达.泥沙输移与水流强度指标[J].水利学报,2003,34(6):1–7.]

[24] Rickenmann D. Bed-load transport measurements with geophones and other passive acoustic methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,143(6):03117004.

[25] Gray J R, Laronne J B, Marr J D. Bedload-surrogate monitoring technologies[M]. Reston VA: US Department of the Interior,US Geological Survey,2010.

[26] Ryan S E, Porth L S, Troendle C A. Coarse sediment transport in mountain streams in Colorado and Wyoming, USA [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2005,30(3):269–288.

[27] Hayward J A. Hydrology and stream sediments in a mountain catchment[M]. Lincoln: Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute,1980.

[28] Emmett W W. A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley–Smith bedload sampler[M]. 79 US Government Printing Office,1980.

[29] Helley E J, Smith W. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler[M]. Menlo Park: US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division,1971.

[30] Habersack H M, Laronne J B. Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helley–Smith sampling in an alpine gravel bed river[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,128(5):484–499.

[31] Bunte K, Abt S R, Potyondy J P, et al. Measurement of coarse gravel and cobble transport using portable bedload traps[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,130(9):879–893.

[32] Zhou Dejia. Review of several bedload samplers[J]. Journal of China Hydrology,1983,3(4):28–35.[周德家 . 几种推移质采样器的评介[J]. 水文,1983,3(4):28–35.]

[33] He Qixiu. Experimental study on comparison between Y-64 and AWT 160−2 pebble bed-load samplers[J]. Design of Hydroelectric Power Station,1992,8(2):43–46.[何其修 . Y64 型和 AWT160−2 型卵石推移质采样器比测试验研究[J]. 水电站设计,1992,8(2):43–46.]

[34] Zhou Gangyan, Gao Huanjin. Field comparisons of bed load samplers from USA and China[J]. Journal of Sediment Research,2000,25(5):28–31.[周刚炎,高焕锦 . 中国和美国的推移质泥沙采样器野外比测试验[J]. 泥沙研究,2000,25(5):28–31.]

[35] Rickenmann D,Turowski J M,Fritschi B,et al.Bedload transport measurements with impact plate geophones: Comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(7):928–942.

[36] Camenen B, Jaballah M, Geay T, et al. Tentative measurements of bedload transport in an energetic alpine gravel bed river[C]//River flow. San José: CRC Press/Taylor & Francis Group,2012:379–386.

[37] Rigby J R, Wren D G, Kuhnle R A. Passive acoustic monitoring of bed load for fluvial applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,142(9):02516003.

[38] Geay T,Zanker S,Misset C,et al.Passive acoustic measurement of bedload transport: Toward a global calibration curve?[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020,125(8):e2019JF005242.

[39] Rickenmann D, Ammann L, Nicollier T, et al. Comparison of calibration characteristics of different acoustic impact systems for measuring bedload transport in mountain streams [J].Earth Surface Dynamics,2022,10(6):1165–1183.

[40] Kuhnle R A, Wren D G, Hilldale R C, et al. Laboratory calibration of impact plates for measuring gravel bed load size and mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(12):06017023.

[41] Rickenmann D, McArdell B W. Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2007,32(9):1362–1378.

[42] Wyss C R, Rickenmann D, Fritschi B, et al. Measuring bed load transport rates by grain-size fraction using the Swiss plate geophone signal at the erlenbach[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,142(5):04016003.

[43] Nicollier T, Antoniazza G, Rickenmann D, et al. Improving the calibration of the Swiss plate geophone bedload monitoring system by filtering out seismic signals from extraneous particle impacts[J]. Earth and Space Science,2022,9 (5):e2021EA001962.

[44] Chen Z,He S,Nicollier T,et al.Finite element modelling of the Swiss plate geophone bedload monitoring system[J]. Journal of Hydraulic Research,2022,60(5):792–810.

[45] Chen Z, He S, Badoux A, et al. A novel acoustic bedload monitoring system with phased microphone arrays and an accelerometer for particle localization and size estimation [J].Earth Surface Dynamics,2025,13(6):1181−1203.

[46] Mizuyama T, Oda A, Laronne J B, et al. Laboratory tests of a Japanese pipe geophone for continuous acoustic monitoring of coarse bedload[J]. US Geological Survey Scientific Investigations Report,2010,5091:319–335.

[47] Mao L, Carrillo R, Escauriaza C, et al. Flume and field-based calibration of surrogate sensors for monitoring bedload transport[J].Geomorphology,2016,253:10–21.

[48] Tsutsumi D, Fujita M, Nonaka M. Transport measurement with a horizontal and a vertical pipe microphone in a mountain stream: Taking account of particle saltation[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2018,43(5):1118–1132.

[49] Chen Zheng. Monitoring and parameter measurement of bedload transport in mountain streams with acoustic systems[D].Chengdu:Institute of Mountain Hazards and Environment,Chinese Academy of Sciences,2022.[陈政 . 山区河流推移质声学系统监测与参数反演研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2022.]

[50] Krein A, Klinck H, Eiden M, et al. Investigating the transport dynamics and the properties of bedload material with a hydro-acoustic measuring system[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2008,33(1):152–163.

[51] Thorne P D. Laboratory and marine measurements on the acoustic detection of sediment transport[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1986,80(3):899–910.

[52] Thorne P D. An overview of underwater sound generated by interparticle collisions and its application to the measurements of coarse sediment bedload transport[J]. Earth Surface Dynamics,2014,2(2):531–543.

[53] 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.

[54] Gimbert F, Fuller B M, Lamb M P, et al. Particle transport mechanics and induced seismic noise in steep flume experiments with accelerometer-embedded tracers[J].Earth Surface Processes and Landforms,2019,44(1):219–241.

[55] 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): e2019JF005416.

[56] Dietze M, Lagarde S, Halfi E, et al. Joint sensing of bedload flux and water depth by seismic data inversion[J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9892–9904.

[57] Antoniazza G, Nicollier T, Wyss C R, et al. Bedload transport monitoring in alpine rivers: Variability in Swiss plate geophone response[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4089.

[58] Nicollier T, Rickenmann D, Hartlieb A. Field and flume measurements with the impact plate: Effect of bedload grain-size distribution on signal response[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(8): 1504–1520.

[59] Nasr M, Geay T, Zanker S, et al. A physical model for acoustic noise generated by bedload transport in rivers[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2022, 127(1): e2021JF006167.

[60] 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.

[61] 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): 2011GL050255.

[62] Arran M I, Mangeney A, De Rosny J, et al. Laboratory landquakes: Insights from experiments into the high-frequency seismic signal generated by geophysical granular flows[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2021, 126(5): e2021JF006172.

[63] Piantini M, Gimbert F, Bakker M, et al. Using a dense seismic array to study fluvial processes in a braided river reach under flood conditions[J]. LHB, 2022, 108(1): 2053314.

[64] Antoniazza G, Dietze M, Mancini D, et al. Anatomy of an alpine bedload transport event: A watershed-scale seismic-network perspective[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2023, 128(8): e2022JF007000.

[65] Kularatna N, Melville B, Akeila E, et al. Implementation aspects and offline digital signal processing of a smart pebble for river bed sediment transport monitoring[C]//Proceedings of the Sensors, 2006 IEEE. Daegu: IEEE, 2007: 1093–1098.

[66] Conevski S, Guerrero M, Rennie C D, et al. Towards an evaluation of bedload transport characteristics by using Doppler and backscatter outputs from ADCPs[J]. Journal of Hydraulic Research, 2021, 59(5): 703–723.

[67] Wyss C R, Rickenmann D, Fritschi B, et al. Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 1. Impulse counts and particle size identification[J]. Water Resources Research, 2016, 52(10): 7744–7759.

[68] Turowski J M, Rickenmann D. Tools and cover effects in bedload transport observations in the Pitzbach, Austria[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(1): 26–37.

[69] Chen Z, Wang J, Luo M, et al. An analytical model of particle impact rate in partially dense inclined granular flow driven by gravity[J]. Earth and Space Science, 2025, 12(8): e2024EA003655.

[70] Turowski J M, Böckli M, Rickenmann D, et al. Field measurements of the energy delivered to the channel bed by moving bed load and links to bedrock erosion[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(4): 2438–2450.

[71] Chen Z, He S, Nicollier T, et al. Signal response of the Swiss plate geophone monitoring system impacted by bedload particles with different transport modes[J]. Earth Surface Dynamics, 2022, 10(2): 279–300.

[72] Kean J W, Coe J A, Coviello V, et al. Estimating rates of debris flow entrainment from ground vibrations[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(15): 6365–6372.

[73] Lai V H, Tsai V C, Lamb M P, et al. The seismic signature of debris flows: Flow mechanics and early warning at montecito, California[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(11): 5528–5535.

[74] Farin M, Mangeney A, de Rosny J, et al. Relations between the characteristics of granular column collapses and resultant high-frequency seismic signals[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(12): 2987–3021.

[75] Bachelet V, Mangeney A, Toussaint R, et al. Acoustic emissions of nearly steady and uniform granular flows: A proxy for flow dynamics and velocity fluctuations[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2023, 128(4): e2022JF006990.

[76] Zhang Z, Walter F, McArdell B W, et al. Analyzing bulk flow characteristics of debris flows using their high frequency seismic signature[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(12): e2021JB022755.

[77] Ammon C, Velasco A, Thorne Lay T, et al. An overview of earthquake and seismic-wave mechanics[J]. Foundations of modern global seismology, 2020, 2: 39–63.

[78] 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.

[79] Julien P Y, Bounvilay B. Velocity of rolling bed load particles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(2): 177–186.

[80] Auel C, Albayrak I, Sumi T, et al. Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 1. Particle dynamics[J].

Earth Surface Processes and Landforms,2017,42(9):1365–1383.

[81]Rickenmann D, Badoux A, Steeb N. Fractional bedload transport at the Erlenbach stream determined by the impact plate geophone system[C]. Vienna: EGU General Assembly 2018,2018:EGU2018-6011.

[82] Schenato L,Tecca P R,Deganutti A M,et al.Distributed acoustic sensing of debris flows in a physical model[C]//Proceedings of Optical Fiber Sensors 2020. Washington D C: OSA Technical Digest,2020.

[83] Chen Z, He S. Experimental investigation of particle impacts using distributed acoustic sensing[C]. Vienna: EGU General Assembly 2025,2025:EGU25-16650.

Advances in Monitoring of Bedload Transport in Mountain Rivers with High-frequency Acoustic Signals

CHEN Zheng[1,2], *FANG Weihua*[3], *HSU Shaohua Marko*[4], *LUO Ming*[5], *HE Siming*[6,7]

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2.Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf 8903, Switzerland;
3.Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China;
4.Feng Chia University, Taichung 407102, China;
5.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
6.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;
7.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Significance Quantitative prediction of bedload transport in mountain rivers is a key component in assessing water-related hazards and advancing hydraulic engineering applications. However, bedload transport rates exhibit substantial spatio-temporal variability under given flow conditions, leading to a limited understanding of bedload transport processes due to measurement difficulties, particularly in steep mountain streams. This study aims to emphasize research progress in monitoring technology for bedload transport in mountain rivers to advance quantitative measurement of bedload rates.

Progress Direct and indirect methods were generally two typical approaches for measuring bedload transport rate. The traditional direct methods measured the transported bedload mass using installed physical samplers and traps on the riverbed for a short time duration. These direct methods for measuring bedload were generally of low efficiency and limited accessibility due to the complex mechanisms of the bedload transport process, which made it challenging to obtain continuous and long-term bedload rates under large flow discharges and steep mountain streams. In contrast, the indirect methods, particularly the acoustic-based monitoring devices, including piezoelectric sensors, hydrophones, microphones, geophones, and seismometers, provided long-term continuous data on the bedload transport process. Bedload transport triggered high-frequency acoustic vibrations, which offered new perspectives for bedload measurement and can be translated into bedload transport rates based on model inversion. Considerable efforts were made toward developing various acoustic bedload monitoring systems, which were constructed and utilized to record high-frequency acoustic vibrations generated by inter-collisions among particles and by bedload particles impacting the riverbed, with the goal of improving the understanding of the bedload transport process. These acoustic-based indirect bedload monitoring technologies included the use of the node seismometer system, the hydrophone or underwater microphone system, the acoustic Doppler current profiler, the Swiss plate geophone (SPG) system, the mini-plate accelerometer (MPA) system, the Japanese pipe microphone (JPM) system, the phased microphone array (PMA) system, and the square pipe system (SPS). The acoustic signals recorded by these systems were utilized to analyze the acoustic sources and ultimately served to derive the bedload transport fluxes and grain size distributions based on calibration relationships that linked sediment-generated signals with bedload characteristics such as particle size and transport mass. However, significant discrepancies between predictions and observations were found, possibly due to variations in the spatial impact locations of bedload particles, impact angles, particle shapes, streamflow velocities, grain size distributions, and particle transport modes. The key issues in monitoring the bedload transport process using high-frequency acoustic signals were summarized in the following four aspects: 1) the construction of a multimodal acoustic monitoring system to fully record the high-frequency signals generated by transported bedload mass impacting the system plate or riverbed; 2) the characteristic analysis and processing of bedload-generated signals through noise reduction, convolutional transformation, and characterization of vibration signals to obtain signal packets, numbers of signal impulses, maximum amplitudes, and characteristic frequencies including centroid and peak frequencies, power spectral density, and other important parameters; 3) the development of algorithms for interpreting bedload-generated high-frequency signals, including localization of the acoustic source, establishment of the physical model of the acoustic source, and construction of the signal propagation and attenu-

ation model; and 4) the inversion of physical parameters of bedload transport, utilizing the vibration signals with established quantitative calibration models to calculate key parameters such as particle size, transport velocity, and transport rate.

Conclusions and Prospects In this study, the research progress on high-frequency signals utilized to monitor the process of bedload transport in steep mountain rivers is summarized based on the four aspects mentioned above, in combination with the latest findings of the authors. The current discussion addresses several issues confronting this research field and provides recommendations to overcome these challenges. Of particular concern are the inversion models and calibration relationships between the generated acoustic signals and bedload transport, whose adaptability to different river environments remains open for further investigation. In addition, persistent issues such as the limited diversity of monitoring methodologies and the challenges related to the comprehensive recording of signal characteristics continue to present obstacles. In response to these challenges, the authors recommend developing a robust and comprehensive acoustic monitoring system based on multiple sensors. In addition, the study emphasizes the necessity of conducting more detailed investigations into the source mechanisms of bedload-generated signals to enhance the understanding of the complex interactions between acoustic signals and bedload transport dynamics. In addition, the systematic establishment of databases that correlate various signal response indicators with bedload transport characteristics is essential. Finally, integrating insights from machine learning theory can provide improved predictive capabilities, enhancing the accuracy of inferring bedload transport rates from generated signals. Accordingly, this study provides a scientific reference for advancing the monitoring of bedload transport in steep mountain rivers, quantitatively assessing hydrological hazards, and guiding the construction and long-term operation of hydraulic engineering structures.

Key words: mountain river; bedload; acoustic vibration signals; monitoring system; source mechanism; bedload transport rate

（编辑　李轶楠）

引用格式: Chen Zheng,Fang Weihua,Hsu Shaohua Marko,et al.Advances in monitoring of bedload transport in mountain rivers with high-frequency acoustic signals[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(6):1–17.[陈政,方卫华,许少华,等.山区河流推移质输移高频声震信号监测研究进展[J].工程科学与技术,2025,57(6):1–17.]