

潘宗源, 戴建玲, 文日海, 等. 基于声发射技术的岩溶塌陷监测预警试验研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1166-1178.

DOI: 10.11932/karst2024y020

基于声发射技术的岩溶塌陷监测预警试验研究

潘宗源^{1,2,3,4}, 戴建玲^{1,2,3}, 文日海⁵, 蒙彦^{1,2,3}, 蒋小珍^{1,2,3}, 马 骁^{1,2,3},
白 冰^{1,2,3}, 吴远斌^{1,2,3,4}, 张 心^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质调查局岩溶塌陷防治创新中心, 广西 桂林 541004;
3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 4. 桂林理工大学
土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 5. 广西壮族自治区桂林水文地质工程
地质勘察院有限公司, 广西 桂林 541002)

摘 要: 岩溶塌陷是土体损伤孔洞发育并最终导致盖层失稳的动力地质过程, 故查明土体损伤特征及演化过程是提出有效监测预警方法的重要前提。文章利用声发射与光纤光栅传感技术对岩溶塌陷形成过程展开模型试验, 甄别与筛选声发射关键信号特征, 并建立其与岩溶塌陷的响应机制。试验结果表明: (1) 大雨条件下岩溶塌陷的形成演化过程里, 覆盖层深部声发射信号振铃计数较浅部增大 6.78~6.89 倍, 幅度增大 1.02~1.12 倍, 能量扩大了 4.45~16.60 倍。在暴雨条件下, 覆盖层深部声发射信号振铃计数较浅部增大 14.85 倍, 幅度增大 1.51 倍, 能量扩大了 213.39 倍; (2) 大雨试验工况下是以土洞扩展并失稳破坏的蠕变破坏型岩溶塌陷, 暴雨试验工况下是土层整体错断坍塌的压剪断裂型岩溶塌陷, 不同塌陷类型的声发射信号特征有明显差异; (3) 岩溶塌陷过程中会出现土体滑移、层面错动、孔洞发育和塌陷四类信号波形, 信号波形释能幅值、上升与下降时间、波形持续时间等与岩溶塌陷演化过程土体变形密切相关; (4) 岩溶塌陷过程中声发射频谱信号波形为高频窄脉冲, 其中土体滑移、层面错动、孔洞发育和塌陷等四类信号频域能量分别集中在 50 kHz 和 20 kHz 左右的高频区段; (5) 声发射累计振铃计数与覆盖层孔隙水压力、土压力和土体位移的变化过程存在紧密的关联性, 在土体变形与塌陷时会导致声发射振铃计数增加或突发性跃迁现象, 因此证明声发射技术用于岩溶塌陷监测预警是可行的。

关键词: 岩溶塌陷; 降雨条件; 声发射; 信号特征; 监测预警

创新点: 将声发射和光纤光栅技术应用于岩溶塌陷地质灾害监测预警领域, 揭示不同降雨诱发岩溶塌陷条件下声发射参数变化规律, 厘清岩溶塌陷形成过程的关键声发射时域特征与频域特征, 建立声发射特征与岩溶塌陷的时空响应关系, 揭示岩溶塌陷的声发射临界参数指标。

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2024) 05-1166-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基金项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021003); 广西自然科学基金资助项目(2023GXNSFAA026432); 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026028); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2023016、2023017); 中国地质科学院基本科研业务费项目(JKYQN202369); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2023013); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230441)

第一作者简介: 潘宗源(1987—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向: 工程地质灾害机理与防治。E-mail: 65709162@qq.com。

收稿日期: 2023-08-30

0 引言

岩溶塌陷是上覆岩土体在自然与人为因素作用下,产生变形破坏并在地面形成塌陷坑的岩溶动力地质作用现象^[1]。据现有调查统计,我国岩溶塌陷总数超3万余起,塌陷分布区域涵盖了22个省区、143个县(市),尤其在长江中下游、珠三角、长三角、京津冀等重要经济区岩溶塌陷问题极为突出,已成为威胁城市基础设施体系化建设及构建绿色高效城市生态圈的重要难题^[2]。目前岩溶塌陷监测预警的研究主要集中在水文地质因素分析研判、物理模型试验研究和数学力学模型预测等方面。譬如,廖如松^[3]、项式均等^[4]统计岩溶塌陷影响因素类型和概率,应用多元回归和逐步判别分析法对类似岩溶地区地面塌陷进行分析与预测。武鑫等^[5]针对诱发岩溶塌陷的8个致灾因子,运用层次分析法—模糊综合评价法分析评价研究区岩溶塌陷易发程度。该类方法对于影响因素的选取和影响作用分析直接关系到预测结果的准确性,因此亦有不少学者从水动力致塌方面提出预测方法。蒙彦等^[6]讨论了水位波动幅度、波动频率和波动时间3个随机变量的极值分布问题,结合概率统计理论提出岩溶塌陷预测方法。高宗军等^[7]提出结合岩溶水位、水量、浊度及主要化学组分等指标,实现短时间、小范围的较高精度岩溶塌陷预测预报方法的设想。为进一步量化探究土体变形破坏过程和阈值条件,管振德^[8]、Jiang等^[9]应用光纤传感技术分析岩溶塌陷过程覆盖土层应力场变化特征,但激光脉冲在光纤中散射效应会造成定位误差。蒋小珍等^[10]通过监测岩溶含水层水气压力动态来达到岩溶塌陷预警的目的,取得了较好的应用效果。姜伏伟等^[11]探讨了抽排水诱发岩溶塌陷的临界条件,但未考虑实际环境中因为土体各向异性导致极限渗压值的变化,以及由此导致预警预报不及时的情况。此外,关于覆盖层力学稳定性问题,王滨等^[12]针对泰安市东羊娄岩溶塌陷的演化过程分析真空吸蚀作用对岩溶塌陷的影响机制。高培德等^[13]综合爆破、真空负压、自重和渗透等因素建立极限平衡方程,对地下工程建设影响下覆盖层稳定性和塌陷范围进行判定和预测。综上,岩溶塌陷监测预警研究主要以水动力条件和隐伏土体变形监测作为研究手段,研究过程忽略了自然或人为因素对土体的损伤作用。而

覆盖土层作为塌陷物质的主要来源,其破坏变形是逐次累积、量变乃至质变的结果,以往研究方法是以探求土体临界渗透坡降或位移增量阈值为主要目的,从而忽略土体损伤过程对岩溶地面塌陷结果的影响,这也是导致长期以来岩溶塌陷这一重要而又普遍的地质灾害问题的监测预警研究未能取得重大突破的原因之一。

近年来,声发射技术作为一种新型动态无损探测技术,在桥梁工程^[14]、建筑工程^[15]、水利和岩体工程等^[16-17]诸多领域被广泛应用,但也有不少学者用于土体损伤方面的研究。例如,Koerner等^[18]开展了三轴应力条件下土体声发射室内试验,发现声发射事件数量与土体含水率、静水压力和轴向应力值等关系密切,在高含水率、静水压力和轴向应力条件下土体声发射数量也会急剧增加。Kurlenya等^[19]通过室内试验测定不同应力条件下土体声发射信号事件数量,研究声发射信号对压力量级的响应规律。Huang等^[20]研究发现渗流条件下土体声发射信号为正态分布的宽带高斯信号类型,声发射活动在0.8~10 kHz频率范围内最为显著,声发射强度与土体渗透特性、渗流速率关系密切。Leary等^[21]采用声发射技术分析自然吸水和降雨冲击作用下土体内部旧裂隙发育和新裂隙衍生的过程。Lu等^[22]基于室内土洞渗流蚀变的声发射无损监测模型试验,证明声发射传播速率能较好地反映土洞溶蚀过程、土体饱水率、土体内部变化的渗透压力等内容。陈天奇^[23]对复合岩土材料开展声发射试验研究,总结了不同材料类型和组合形式下发生破坏的声发射特征。Mao等^[24]研究了施工沉桩过程声发射振铃计数、幅值、能量等参数特征变化过程,认为土体屈服极限可以通过声发射活动特征来表征。闫梦晴等^[25]研究土体无侧限抗压试验过程声发射特征参数的变化规律,证明了声发射特征参数对土体应力变化过程的敏感度较高。李明宝等^[26]探讨了不同含水率试样在压缩条件下声发射参数、应力分布规律,构建了声发射能量累计数与应变的关系模型以及声发射损伤模型。张攀^[27]研究指出松散堰塞坝溃决过程中泥流渗透、土体细颗粒运移及坝体坍塌都会产生声发射现象,同时溃决时长、溃口和溃槽的形成与扩展以及溃决过程中坍塌直接影响着声发射能量的大小。虽然目前声发射技术在土力学应用中取得不错的成效,但与岩体等脆性材料不同的是,弹塑性土体孔隙与裂

隙等损伤部位发展所释放信号的频率范围、能量大小,以及覆盖层损伤致塌的信号特征等方面的研究还处于空白阶段,同时这也是制约声发射技术应用于实际环境下岩溶塌陷监测预警的瓶颈所在。

鉴于声发射信号传播速率和范围受材料含水率与类型等因素影响较为显著,而水动力条件却是岩溶塌陷的主要诱发因素,尤其当前在极端气候条件下岩溶塌陷形成机制方面的研究成果还不多。因此,本文利用岩溶塌陷模型试验的方法,获取降雨触发岩溶塌陷过程中声发射参数特征演变规律,甄别岩溶塌陷关键信号特性及类型,建立声发射特征与岩溶塌陷多场耦合参数相关性,为提高岩溶塌陷监测预警能力和促进声发射技术在地质灾害防治方面的应用实施提供技术支撑和借鉴。

1 声发射技术的定义与检测原理

声发射(acoustic emission, 简称 AE)是指材料受外力或内力作用而出现变形或者裂纹扩展,所产生的瞬态能量以弹性波的形式快速释放的物理现象^[19]。声发射事件反映着材料的微损伤,因此用声发射振

铃计数、幅度等参数特征表征材料的损伤程度。其检测原理是声发射源发射的弹性波最终传播到材料的表面,引起可以探测到的微变形,而声发射传感器将材料的机械振动转换为放大、处理和记录的电信号。该技术优势在于可以动态无损检测,并且对外加结构应力下材料损伤等缺陷活动情况较为敏感;而其由于高敏感度特性亦容易受到外界环境噪声的干扰,因此利用声发射技术对岩溶塌陷进行监测预警时需明晰土体损伤频率范围,并选取最合适传感器开展监测活动。

2 岩溶塌陷声发射室内模型试验

2.1 试验材料

试验红黏土取自桂林临桂区地下约 3 m 处。土体呈棕红色,少碎石与砂砾,天然土体含水率较高,可塑性强。红黏土比重为 2.725, 10 mm 液限为 51.24%,为原生红黏土;经击实试验可得其最大干密度为 1.46 g·cm⁻³、最优含水率为 30.21%。具体物性参数如表 1 所示。

表 1 试验材料基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of the experimental materials

最优含水率 $\omega/\%$	最大干密度 $\rho_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	土粒比重 G_s	压缩模量 E_s/Mpa
30.21	1.46	51.24	34.34	19.9	2.725	10.11

对取回后红黏土采用自然晾晒风干处理,为避免烘箱干燥对土体的物理力学性质产生的影响,因此使用木槌对风干红黏土进行锤击破碎,并依据《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》相关操作方法,采用筛分法将红黏土筛选后用于试验。

2.2 试验仪器

采用 SAEU3H 声发射监测系统,系统由声发射传感器、PAS 信号放大器及 SAEU3H 声发射检测仪三部分组成(图 1)。声发射传感器为低频窄带传感器,工作频率范围 15~70 kHz,接触面采用陶瓷材料,整体电流屏蔽,有效降低干扰。PAS 信号放大器为宽带通用型,响应频率 1.3 kHz~1.2 MHz,增益可选 20、40 和 60 dB。SAEU3H 声发射检测仪共有 4 个采集卡,每个采集卡具有 4 个独立通道,单通道最大

采样率 10 M 点·秒⁻¹,响应频率 1 kHz~2.5 MHz。

为验证声发射监测结果与塌陷过程的吻合度,模型试验中分别采用 NZS-FBG-CSG 型定点式应变感测光纤光栅、NZS-FBG-EPC(M) 型光纤光栅迷你土压力计及 NZS-FBG-MOM 型光纤光栅微型渗压计分别监测土体变形、土应力、孔隙水压力的变化过程,各传感器经标定后分别埋入土体,埋设深度与声发射传感器相一致。

2.3 试验方法

为再现实际环境中岩溶塌陷形成过程,本次试验降雨强度设为大雨和暴雨等级,覆盖层厚度设置为 20 cm。考虑到岩溶塌陷通常是土洞自下而上渐进破坏的过程,将声发射传感器与孔隙水压力、土压力以及土体应变传感器分两层平行布设,即布设于

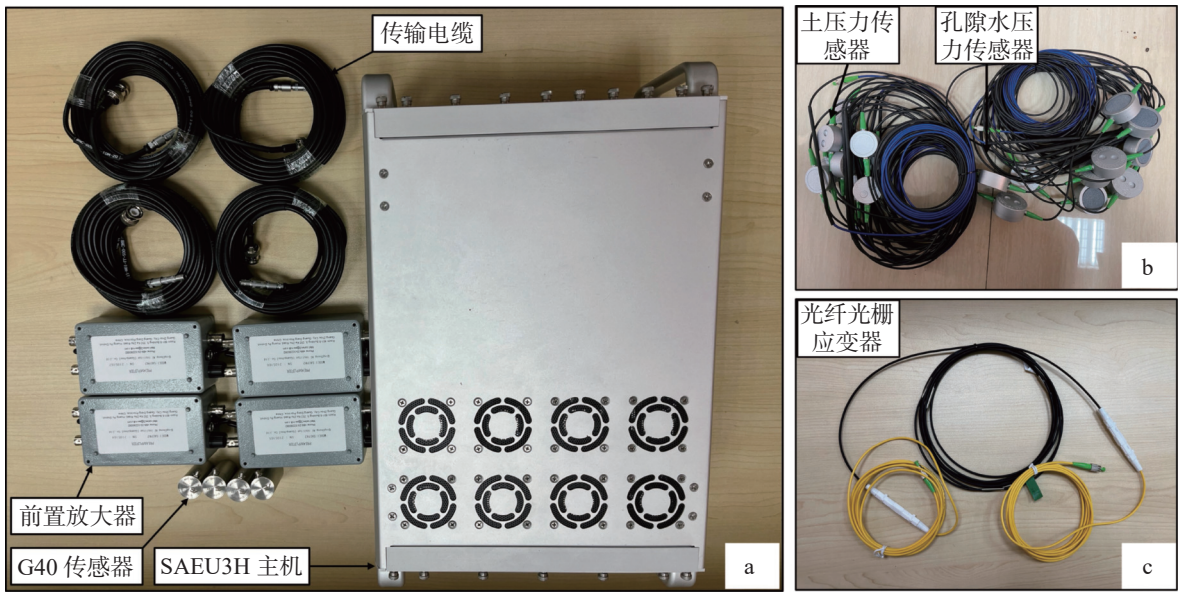


图 1 试验仪器与监测系统展示图

Fig. 1 Diagram of the experimental equipment and monitoring system

土体埋深 20 cm 和 10 cm 处(图 2)。为便于不同类型传感器的监测结果相互对比分析,将不同类型传感器相邻间距设为 5 cm。另外,为最大程度捕获声发射信号,声发射信号接收端向下埋设并尽量贴合土层表面。

覆盖层渗流场、应力场与应变场监测系统中,采集频率设为 30 Hz。SAEU3H 声发射监测系统的前放增益 40 dB,采用门限触发方式,波形门限为 30 dB,采样频率 6 000 kHz。具体试验步骤如下:①打开降雨阀门,使用微电脑控制降雨强度为大雨和暴雨,降雨量分别为 6 mm 和 14 mm,降雨历时控制为 120 s;②启动覆盖层多场耦合监测系统,实时采集覆盖层

孔隙水压力、土压力和土体变形数据;③开启声发射监测系统,实时监测岩溶塌陷形成演化过程声发射参数特征;④达到设定降雨量阈值时,微电脑控制降雨阀门闭合,并打开排水管道阀门,将地下水位恢复至初始状态后,关闭排水管道阀门;④待土层自稳固结 30 min 后,重复上述步骤继续试验,直到发生地面塌陷时终止试验。

3 试验结果及分析

3.1 声发射参数特征

大雨条件下覆盖层经历 2 次降雨过程后发生地面塌陷,而相同盖层条件时一次暴雨后便发生塌陷。由图 3 和图 4 可见,土体浅层与深层声发射特征具相似变化规律,但参数量级不同。其中,在大雨条件下,首次降雨过程覆盖层浅部声发射信号振铃计数变化范围 1~204 次,幅度范围 30.5~147.6 dB,能量 $0\sim11.6\times10^{-3}$ PJ;二次降雨过程浅部声发射信号振铃计数变化范围 1~348 次,幅度范围 30.5~175.9 dB,能量 $0\sim57\times10^{-3}$ PJ。另外,首次降雨过程覆盖层深部声发射信号振铃计数变化范围 1~1406 次,幅度范围 30.5~164.8 dB,能量 $0\sim51.6\times10^{-3}$ PJ;二次降雨过程深部声发射信号振铃计数变化范围 1~2 361 次,幅度范围 30.5~179 dB,能量 $0\sim946.4\times10^{-3}$ PJ。可见,大雨条件下覆盖层深部声发射信号振铃计数较浅部增大 6.78~6.89 倍,幅度增大 1.02~1.12 倍,能量扩大了

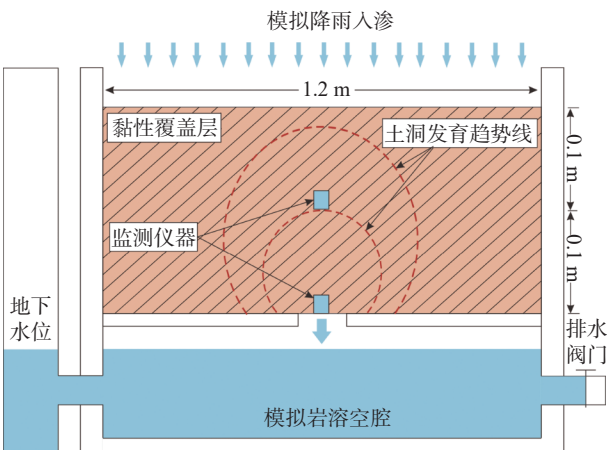


图 2 监测仪器布设与试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental equipment and monitoring apparatus

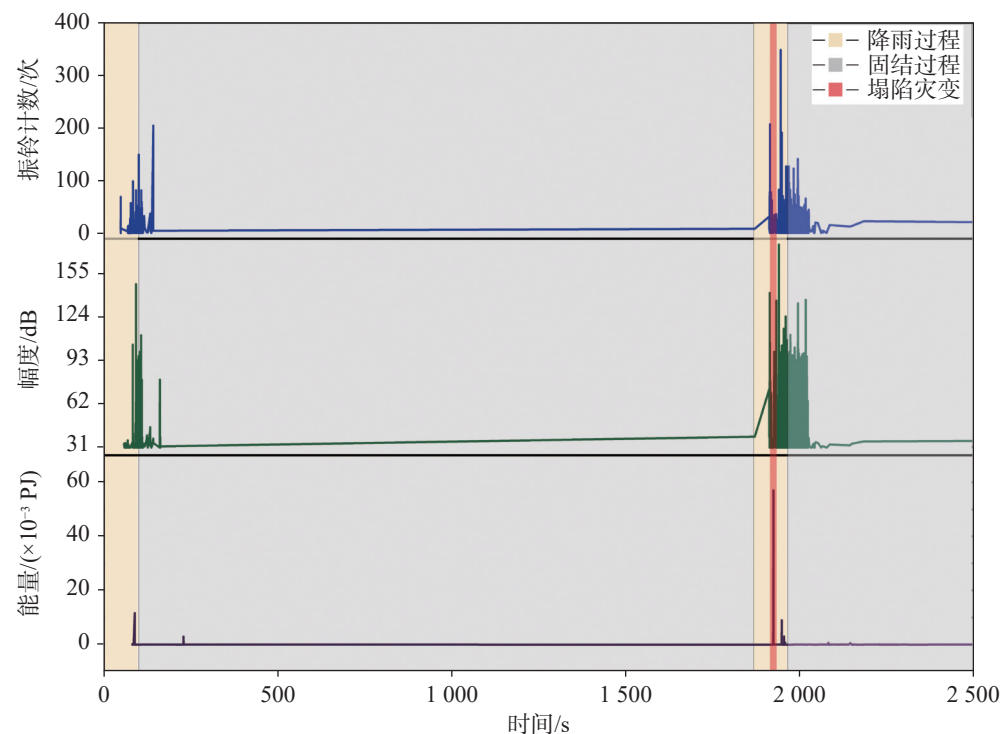


图 3 大雨条件下土体浅层声发射参数特征

Fig. 3 Characteristic of acoustic emission parameters in shallow soil mass under heavy rain conditions

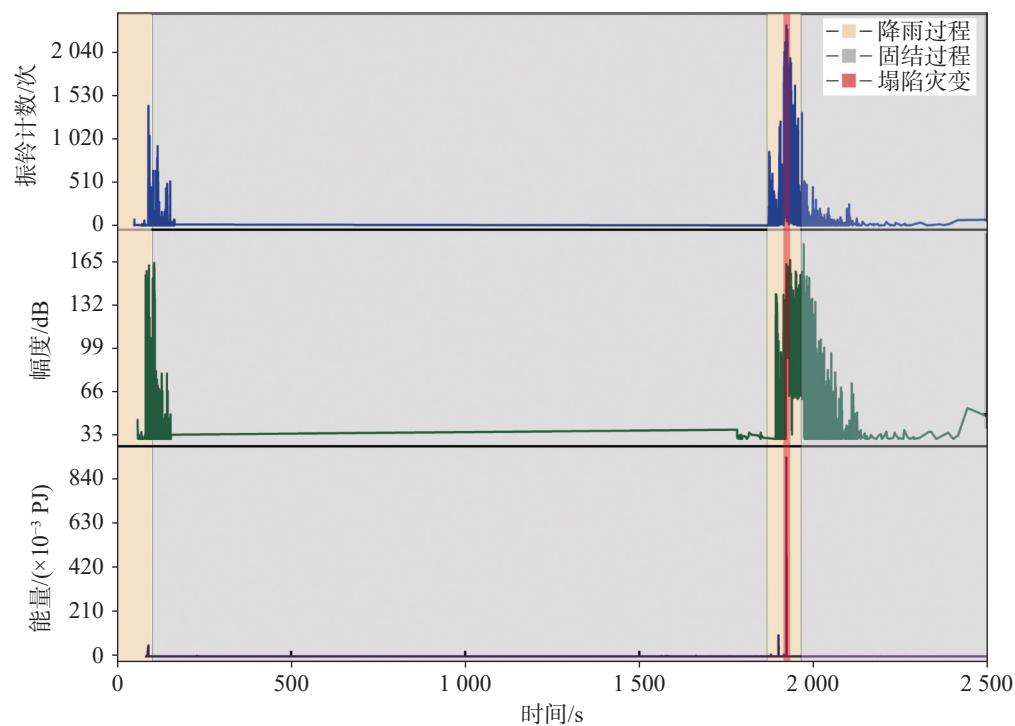


图 4 大雨条件下土体深层声发射参数特征

Fig. 4 Characteristic of acoustic emission parameters in deep soil mass under heavy rain conditions

4.45~16.6 倍。相比而言,如图 5 和图 6 所示,在暴雨条件下,覆盖层浅层声发射信号振铃计数变化范围 1~89 次,幅度范围 30.5~140.9 dB,能量 0~22×10⁻³ PJ;

覆盖层深部声发射信号振铃计数变化范围 1~1322 次,幅度范围 30.5~213.1 dB,能量 0~4694.6×10⁻³ PJ。经统计,覆盖层深部声发射信号振铃计数较浅部增

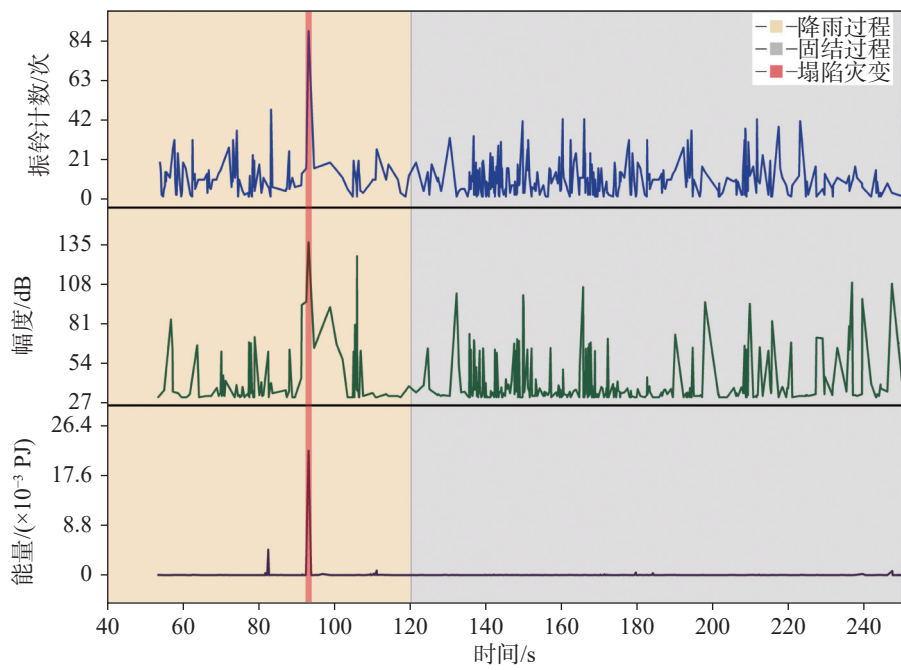


图 5 暴雨条件下土体浅层声发射参数特征

Fig. 5 Characteristic of acoustic emission parameters in shallow soil mass under rainstorm conditions

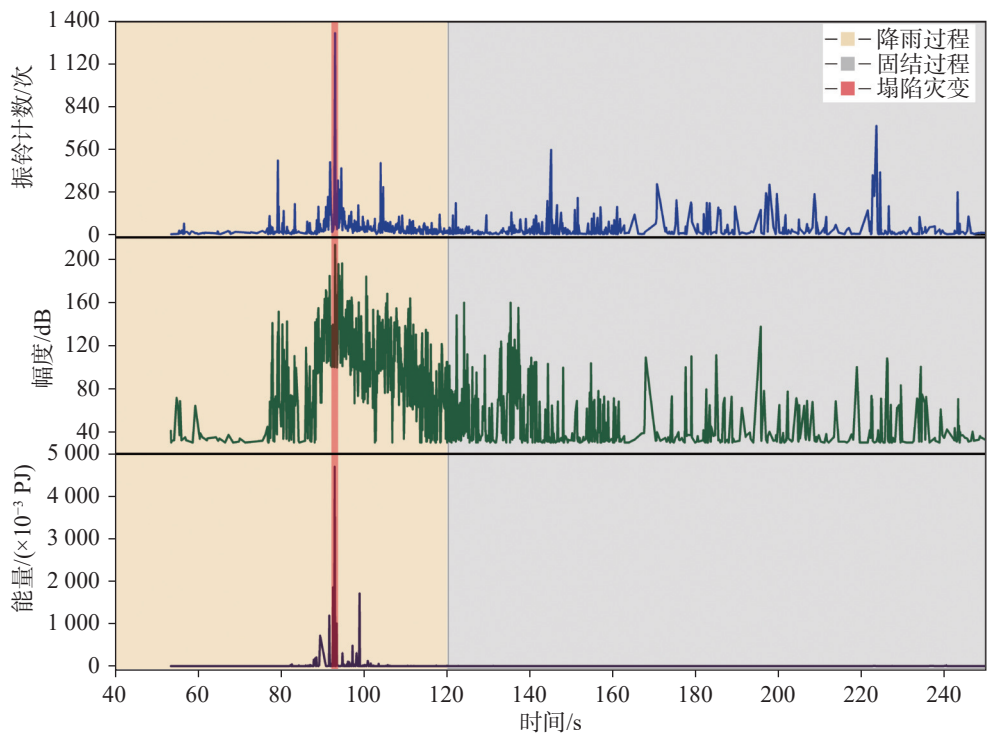


图 6 暴雨条件下土体深层声发射参数特征

Fig. 6 Characteristic of acoustic emission parameters in deep mass layer under rainstorm conditions

大 14.85 倍,幅度增大 1.51 倍,能量扩大了 213.39 倍。

结合岩溶塌陷演化过程进行分析,大雨试验工况下覆盖层经历两次降雨后始发生塌陷,是以土洞扩展并失稳破坏的蠕变破坏型岩溶塌陷,但在土层最终塌陷时所释放的能量仍会高于前期蠕变破坏阶

段,所以二次降雨过程声发射信号特征活跃性较高。暴雨试验工况下覆盖层很快达到自身稳定极限并发生破坏,为土层整体错断坍塌的压剪断裂型岩溶塌陷,相当于土层应变能一次性完全释放,从而出现声发射信号特征急剧增大的现象。另一方面,在降雨

阶段覆盖层浸水软化和饱水增荷后产生变形,而停雨后随着渗压动力因素地消失,土层内部应力重新平衡并趋于稳定,因此在降雨过程声发射信号特征活跃性较高,而排水固结过程则较低。

3.2 声发射信号时域特征

考虑到岩溶塌陷形成过程中,覆盖层物理特性、波的传播和声源位置的变化对声发射信号特征的耦合影响,对塌陷事件中声发射信号特征进行甄别和对比,并应用小波去噪处理,得到四类信号的典型图形。如图 7a 所示,土体滑移信号波形呈不规则犬牙起伏,电压幅度范围 $-1.86 \times 10^{-4} \sim 1.79 \times 10^{-4}$ V,上升和下降时间分别为 0.057 ms 和 0.21 ms,波形持续时间 0.267 ms。这是土体在渗压作用下产生微变形和滑移,因此内部应变能的释放呈现由小至大再趋于消散的规律。由图 7b 可见,层面错动信号波形近似为

凹三角形,电压幅度范围 $-9.8 \times 10^{-4} \sim 11.5 \times 10^{-4}$ V,上升时间极短,下降时间和持续时间相近,为 0.46 ms。这是由于土体承受压力超过自身强度极限后,盖层间突发性断裂而产生错动现象,因此电压幅值急剧增大后便快速减小。孔洞发育信号波形呈楔子状,电压幅度范围 $-3.45 \times 10^{-4} \sim 3.41 \times 10^{-4}$ V,上升时间和下降时间分别为 0.11 ms 及 0.28 ms,波形持续时间为 0.39 ms(图 7c)。孔洞形成往往经历由小至大的过程,因此电压幅值为缓步上升后再逐步消退的趋势。此外,塌陷形成信号波形为等边三角形和凹三角形的嵌套组合,电压幅度范围 $-5.52 \times 10^{-4} \sim 5.24 \times 10^{-4}$ V,总体呈锯齿状快速波动,原因是塌陷时覆盖土层不断地分解和断裂形成大小各异的土块,土体应变能迅速释放过程产生重叠和嵌套,从而形成特殊的时域波形。

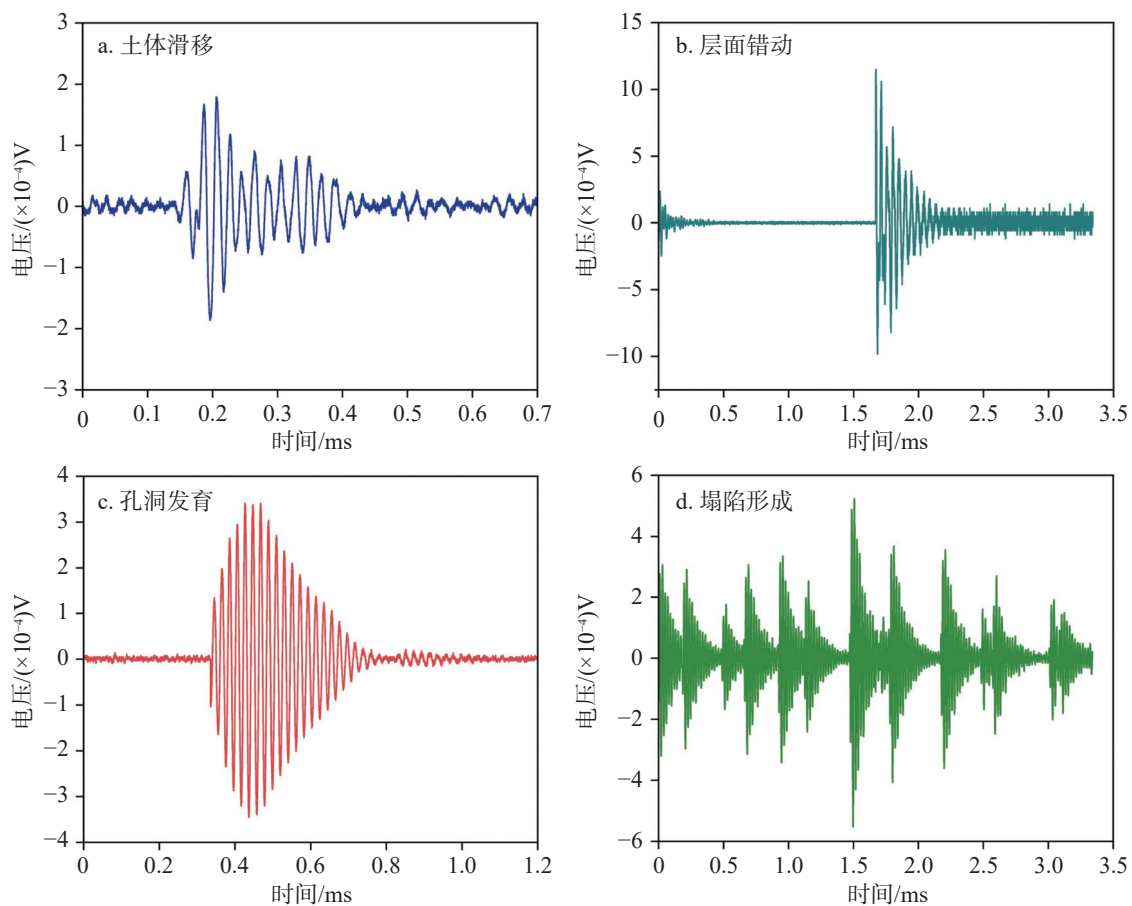


图 7 典型声发射信号时域图形

Fig. 7 Typical signals of acoustic emission in time domain

3.3 声发射信号频域特征

由图 8 可见,声发射信号波形均呈现单峰形式,

为高频窄脉冲。其中土体滑移信号频域能量集中在 50 kHz 左右的高频区段,最大能量幅度为 $44.82 \times$

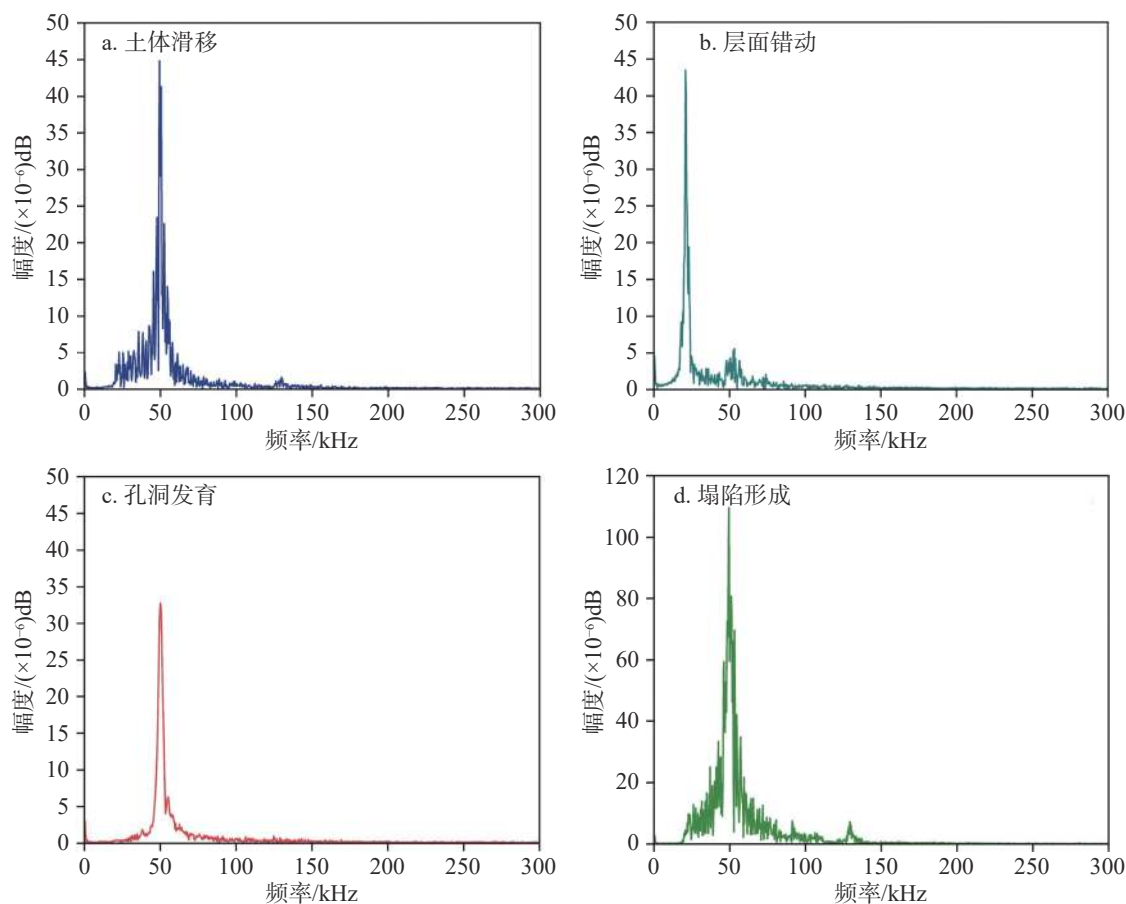


图 8 典型声发射信号频域图形

Fig. 8 Typical signals of acoustic emission in frequency spectrum

10^{-6} dB, 其余频率区段则迅速衰减(图 8a)。由图 8b)可知, 层面错动信号频域能量集中在 20 kHz 左右, 最大能量幅度为 43.5×10^{-6} dB。而孔洞发育和塌陷信号频域能量均集中在 50 kHz 左右的区段, 不同的是孔洞发育能量幅值为 32.75×10^{-6} dB, 塌陷时能量幅值为 109.56×10^{-6} dB, 为前者的 3.35 倍(图 8c 和 d)。可见, 土体滑移与层面错动是土体积聚应变能的突然释放, 因此其能量幅值较大。结合图 7c 中孔洞发育的波形图像可知, 土体孔洞为渐进性发育特征, 其内部能量释放率不高且在土体中衰减速率快, 因此孔洞发育时能量幅度低于土体滑移与层面错动。整体来看, 岩溶塌陷过程由于水体渗流以及土体材料对弹性波的削弱, 导致声发射信号频域范围较窄且衰减较快, 容易造成信号缺失与漏判。

3.4 声发射特征与岩溶塌陷关联分析

由图 9 可见, 在大雨条件下覆盖层的孔隙水压力、土压力和土体位移的变化范围分别为 0~6.83 kPa、0~4.33 kPa 和 0~199.85 μm 。在降雨过程中, 覆

盖层的孔隙水压力、土压力和土体位移呈明显的增大趋势, 降雨结束后三者则减小。这表明覆盖层在降雨入渗作用下孔压和土压的增加, 导致土体产生变形; 而在降雨结束后, 土体因自然排水固结, 内部渗流场和应力场为达到平衡状态而产生重分布现象, 因而土体应变亦随之发生变化, 最终反复的降雨影响下产生塌陷。以覆盖层声发射累计振铃计数来对比分析, 在两次降雨过程中, 随着覆盖层渗流场、应力场和应变场的变化, 声发射振铃计数也产生明显的增大, 尤其在塌陷时浅层和深层振铃计数分别增大了 15 143 次及 29 816 次, 因此动态曲线呈急剧上升的跃迁态势。

另外, 如图 10 所示, 在暴雨条件下覆盖层经历一次降雨后发生塌陷, 其孔压、土压和土体位移变化范围分别为 0~7.36 kPa、0~5.75 kPa 和 153.3 μm 。在暴雨条件下, 覆盖层孔压和土压在短时间内达到自身稳定极限, 因此降雨未结束土层便发生失稳破坏, 由此可见浅薄覆盖层在暴雨影响下极易发生地面塌陷。相应地, 随着岩溶塌陷形成演化过程, 覆盖层浅

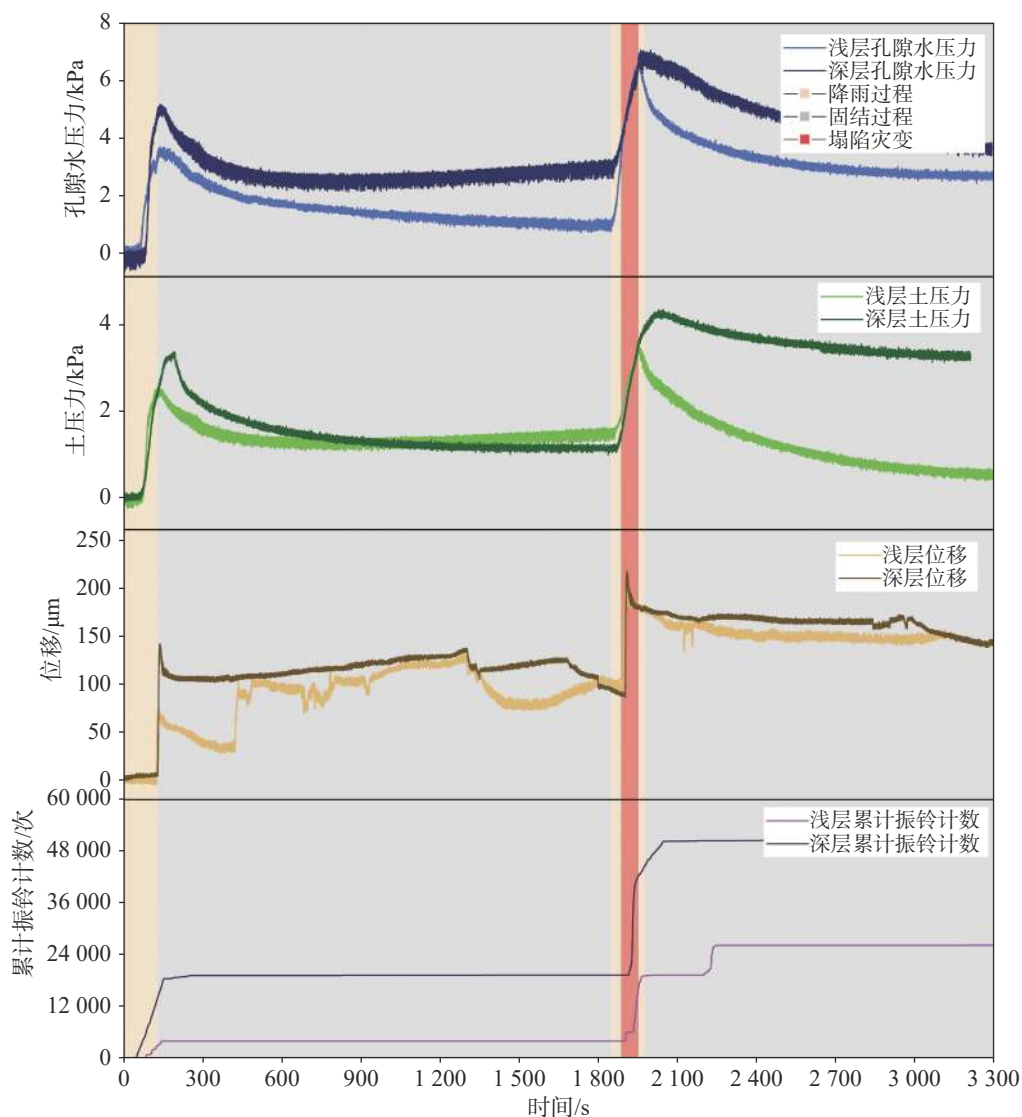


图9 大雨条件下覆盖层多场耦合关联特征

Fig. 9 Multi-field coupling characteristics of overburden layer under heavy rain conditions

部和深部声发射振铃计数也发生突然跃迁现象,其中前者和后者的振铃计数分别突增了 2238 次和 15516 次,而塌陷后声发射振铃计数亦随之逐渐趋于稳定。

4 结 论

(1)大雨条件下,覆盖层塌陷演化过程中,浅部声发射振铃计数变化范围 1~348 次,幅度范围 30.5~175.9 dB,能量 $0\sim57\times10^{-3}$ PJ;深部声发射振铃计数变化范围 1~2361 次,幅度范围 30.5~179 dB,能量 $0\sim946.4\times10^{-3}$ PJ。在暴雨条件下,覆盖层浅层声发射信号振铃计数变化范围 1~89 次,幅度范围 30.5~140.9 dB,能量 $0\sim22\times10^{-3}$ PJ;覆盖层深部声发射信号

振铃计数变化范围 1~1322 次,幅度范围 30.5~213.1 dB,能量 $0\sim4694.6\times10^{-3}$ PJ。

(2)大雨试验工况下是以土洞扩展并失稳破坏的蠕变破坏型岩溶塌陷,但在土层最终塌陷时所释放的能量仍会高于前期蠕变破坏阶段,所以二次降雨过程声发射信号特征活跃性较高。暴雨试验工况下是土层整体错断坍塌的压剪断裂型岩溶塌陷,相当于土层应变能一次性完全释放,从而出现声发射信号特征急剧增大的现象。

(3)岩溶塌陷过程中会出现土体滑移、层面错动、孔洞发育和塌陷四类信号波形,其中土体滑移信号波形呈不规则犬牙起伏,层面错动信号波形近似为凹三角形,孔洞发育和塌陷信号波形分别为楔子状以及等边三角形和凹三角形的嵌套组合形式,而信

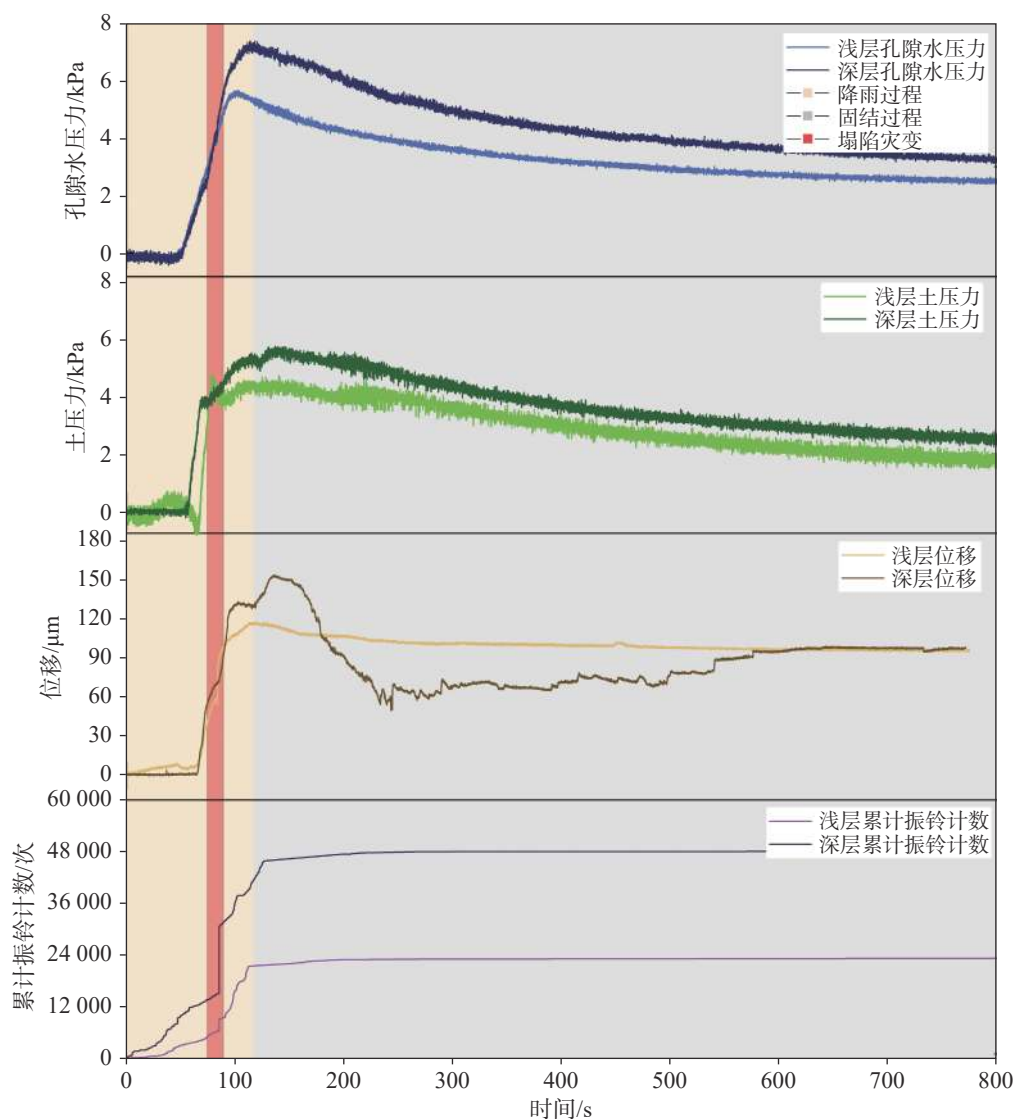


图10 暴雨条件下覆盖层多场耦合关联特征

Fig. 10 Multi-field coupling characteristics of overburden layer under rainstorm conditions

号波形释能幅值、上升与下降时间、波形持续时间等与岩溶塌陷演化过程土体变形密切相关。

(4)岩溶塌陷过程中声发射频谱信号波形为高频窄脉冲,其中土体滑移、层面错动、孔洞发育和塌陷等四类信号频域能量分别集中在50 kHz和20 kHz左右的高频区段,这是由于水体渗流及土体材料对弹性波的削弱导致的。

(5)在岩溶塌陷形成演化过程中,声发射累计振铃计数与覆盖层孔隙水压力、土压力和土体位移的变化过程存在紧密的关联性,在土体变形与塌陷时会导致声发射振铃计数增加或突发性跃迁现象,因此证明声发射技术用于岩溶塌陷监测预警是可行的。

参考文献

- [1] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制[J]. 广西地质, 1989, 2(2): 83-90.
KANG Yanren. On the mechanism of karst collapses[J]. Geology of Guangxi, 1989, 2(2): 83-90.
- [2] 雷明堂, 蒋小珍. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(3): 1-6.
LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Research on the present situation and developing tendency of karst collapse and techniques for its supporting[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 1-6.
- [3] 廖如松. 应用逐步判别法预测岩溶塌陷探讨: 以桂林岩溶地区为例[J]. 中国岩溶, 1987, 6(1): 79-91.
LIAO Rusong. Application of stepwise discriminant analysis to predict land collapse: A case of Guilin karst region[J]. Carsologica Sinica, 1987, 6(1): 79-91.

- [4] 项式均, 陈健, 覃有强. 湖北大冶县大广山铁矿岩溶塌陷的预测和评价[J]. 中国岩溶, 1987, 6(4): 297-314.
XIANG Shijun, CHEN Jian, QIN Youqiang. Prediction and evaluation of karst collapse in Daguangshan iron mine in Daye county, Hubei[J]. *Carsologica Sinica*, 1987, 6(4): 297-314.
- [5] 武鑫, 黄敬军, 缪世贤. 基于层次分析-模糊综合评价法的徐州市岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 836-841.
WU Xin, HUANG Jingjun, MIAO Shixian. Susceptibility zoning and mapping of karst collapse in Xuzhou using analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 836-841.
- [6] 蒙彦, 殷坤龙, 雷明堂. 水位波动诱发岩溶塌陷的概率分析[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 239-243.
MENG Yan, YIN Kunlong, LEI Mingtang. Probabilistic analysis on karst collapse induced by water table fluctuation[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(3): 239-243.
- [7] 高宗军, 鲁统民, 王敏, 冯建国, 刘书江, 王姝. 基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报方法[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 739-745.
GAO Zongjun, LU Tongmin, WANG Min, FENG Jianguo, LIU Shujiang, WANG Shu. Prediction of karst ground collapse based on karst water regime[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 739-745.
- [8] 管振德, 蒋小珍, 高明. 岩溶塌陷光纤传感试验装置的标定试验[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 173-179.
GUAN Zhende, JIANG Xiaozhen, GAO Ming. A calibration test on optical fiber sensing device for karst collapse monitoring[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(2): 173-179.
- [9] Jiang X Z, Gao Y L, Wu Y B, Lei M T. Use of brillouin optical time domain reflectometry to monitor soil-cave and sinkhole formation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 225.
- [10] 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 湖南宁乡大成桥充水矿山疏干区岩溶系统水气压力监测及突变特征[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 179-189.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Character of water or barometric pressure jump within karst conduit in large strong drainage area of karst water filling mine in Dachengqiao, Ningxiang, Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(2): 179-189.
- [11] 姜伏伟, 张发旺, 柳林, 刘伟, 李亮, 陈航. 南宁地铁施工降水诱发岩溶塌陷条件及安全防护措施[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 415-420.
JIANG Fuwei, ZHANG Fawang, LIU Lin, LIU Wei, LI Liang, CHEN Hang. Dewatering induced karst collapse conditions and safety prevention and control measures in Nanning subway construction[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(3): 415-420.
- [12] 王滨, 李治广, 董昕, 陈立. 岩溶塌陷的致塌力学模型研究: 以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 119-125.
WANG Bin, LI Zhiguang, DONG Xin, CHEN Li. Study on mechanical model of karst collapse: A case of karst collapse in Dongyanglou village, Tai'an City[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 119-125.
- [13] 高培德, 王林峰. 覆盖型岩溶塌陷的塌陷机制分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 770-776.
GAO Peide, WANG Linfeng. Analysis of collapse mechanism for mantled karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 770-776.
- [14] Nair A, Cai C S. Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(6): 1704-1714.
- [15] Fricker S, Vogel T. Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(3): 501-510.
- [16] Dixon N, Spriggs M P, Smith A, Meldrum P, Haslam E. Quantification of reactivated landslide behaviour using acoustic emission monitoring[J]. *Landslides*, 2015, 12(3): 549-560.
- [17] Cheon D S, Jung Y B, Park E S, Song W K, Jang H I. Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with waveguides[J]. *Engineering Geology*, 2011, 121(1): 75-88.
- [18] Koerner R M, Lord A E. Acoustic emissions in stressed soil samples[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56(6): 1924-1927.
- [19] Kurlenya M V, Petrov V E, Popov S N, Tkach K B. Applicability of acoustic waveguides for stress measurement in soils[J]. *Journal of Mining Science*, 1997, 33(1): 88-93.
- [20] Huang M H, Lauchle G C, Wang M C. Seepage-induced acoustic emission in granular soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(4): 566-572.
- [21] Leary D, Dicarolo D A, Hickey C J. Acoustic techniques for studying soil-surface seals and crusts[J]. *Ecohydrology*, 2009, 2(3): 257-262.
- [22] Lu Z Q, Wilson G V. Acoustic measurements of soil pipeflow and internal erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 76(3): 853-866.
- [23] 陈天奇. 复合岩土声发射试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
CHEN Tianqi. Experiment of acoustic emission of composites from rock and soil[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [24] Mao W W, Shogo A, Shigeru G. Acoustic emission characteristics of subsoil subjected to vertical pile loading in sand[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 119: 119-127.
- [25] 闫梦晴, 李明宝, 于司杭, 郑宪. 土无侧限抗压试验中的声发射特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 142-146.
YAN Mengqing, LI Mingbao, YU Sihang, ZHENG Xian. Acoustic emission characteristic in soil unconfined compression test[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(33): 142-146.
- [26] 李明宝, 孙振国, 陈冲, 郑宪, 闫梦晴, 于司杭. 单轴压缩下土体声发射参数与力学参数关系研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(30): 278-284.

LI Mingbao, SUN Zhenguo, CHEN Chong, ZHENG Xian, YAN Mengqing, YU Sihang. Study the relationship between acoustic emission parameters and mechanical parameters in soil unconfined compression test[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(30): 278-284.

[27] 张攀. 松散堰塞坝溃决的声发射响应试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

ZHANG Pan. Experimental study on acoustic emission response of loose dam failure[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.

Experiment on monitoring and early warning of karst collapses based on acoustic emission technology

PAN Zongyuan^{1,2,3,4}, DAI Jianling^{1,2,3}, WEN Rihai⁵, MENG Yan^{1,2,3}, JIANG Xiaozhen^{1,2,3}, MA Xiao^{1,2,3}, BAI Bing^{1,2,3}, WU Yuanbin^{1,2,3,4}, ZHANG Xin^{1,2,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 5. Guilin Hydrological Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd. of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541002, China)

Abstract The karst collapse is a dynamic geological process in which the damage of soil mass and development of cavity ultimately result in the instability of the overburden layer. Therefore, identifying the characteristics and evolution of the damage of soil mass are the important prerequisite to develop effective monitoring and early warning methods for karst collapses. However, the commonly used early warning methods that utilize hydrodynamic conditions and optical fiber monitoring technique often overlook both the process of microscopic damage of the soil mass and the effect of damage on karst collapses. Previous studies on karst collapses induced by groundwater or rainfall typically employ qualitative or semi-quantitative methods. These approaches appear to be one of the reasons why karst collapses—major and prevalent geological disasters in karst regions—have seen limited advancement in monitoring and early warning system. In this study, acoustic emission (AE) and fiber grating technology have been firstly applied to conduct model tests on monitoring and early warning methods of karst collapses. The research on dynamic characteristics of AE has been conducted under different rainfall conditions. In addition, the characteristics of key time domains and frequency domains of AE have been identified and selected to establish a spatial-temporal responding mechanism between AE and karst collapses through model experiment.

The results show that as follows, (1) The total ringing count, amplitude, and energy of AE in the shallow overburden layer ranged from 1 times to 348 times, 30.5 dB to 175.9 dB, and 0 PJ to 57×10^{-3} , respectively, under heavy rainfall conditions. In contrast, the same parameters in deep overburden layer ranged from 1 times to 2,361 times, 30.5 dB to 179 dB, and 0 PJ to 946.4×10^{-3} PJ, respectively. In addition, under rainstorm conditions, these parameters in shallow overburden layer ranged from 1 times to 89 times, 30.5 dB to 140.9 dB, and 0 PJ to 22×10^{-3} PJ, respectively, while in deep overburden layer, they ranged between 1 times and 1,322 times, 30.5 dB and 213.1 dB, 0 PJ and $4,694.6 \times 10^{-3}$ PJ, respectively. During the formation of karst collapses under heavy rain conditions, the ringing count of AE in the deep overburden layer increased by 6.78 times to 6.89 times compared to the shallow layer. Additionally, the amplitude of AE in deep overburden layer increased by 1.02 times to 1.12 times compared to the shallow layer. The energy of AE in deep overburden layer increased by 4.45 times to 16.6 times compared to the shallow layer. During the formation of karst collapses under rainstorm conditions, the ringing count, amplitude and energy of acoustic emissions in deep overburden layer increased by 14.85 times, 1.51 times and 213.39 times, respectively, compared to the shallow layer. (2) Under heavy rain conditions, the karst collapses were defined as creep-failure collapses which were caused by the expansion and instability of soil caves. But the energy emitted by the final collapse of the soil cave was larger than the energy emitted by creep-failure collapse, which indicated higher activity of

AE signals. Under rainstorm conditions, the karst collapse was defined as compression-shear fracture collapse caused by the whole fracture and collapse of soil mass. In this process, the strain energy in the soil layer was completely released in a short time. Hence, the AE signals showed a sharp increase in dynamic curve in the second rainfall. This result indicated a strong relationship between AE signal characteristics and types of collapse. (3) There are four types of signal waveforms in the formation of karst collapse, which can be divided as slippage of soil mass, dislocation of soil layer, development of cavity and layer collapse. The irregular up-down fluctuation of signals represented the slippage of soil mass, while concave triangle signals indicated that rainfall dislocated stability of soil layer. Additionally, wedge-shaped signals indicated that a tiny cave was developed in the overburden layer. The signals which were showed as combined form of equilateral triangle and concave triangle implied the occurrence of karst collapse. Therefore, the signal energy, rising and falling time and duration of signal waveforms were closely related to soil deformation in the process of karst collapse. (4) In the formation of karst collapse, the spectrum signal waveforms of AE fell into high frequency narrow pulse form, in which spectrum energy of the four signal types were concentrated in the high frequency range of about 50 kHz and 20 kHz, respectively. (5) The cumulative ringing counts of AE were closely related to pore water pressure, soil pressure and displacement of soil mass. The ringing counts of AE increased in sudden during soil deformation or collapse. This observation indicated that AE technology is feasible for monitoring and early warning of karst collapses.

Key words karst collapse, rainfall, acoustic emission, time-frequency characteristic, monitoring and early warning

(编辑 张玲)