

梁东辉,甘伏平,张伟,等.微动HVSR法在岩溶区探测地下河管道和溶洞的有效性研究[J].中国岩溶,2020,39(1):95-100.
DOI:10.11932/karst20200104

微动HVSR法在岩溶区探测地下河管道和溶洞的有效性研究

梁东辉,甘伏平,张伟,韩凯

(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,广西 桂林 541004)

摘要:微动HVSR(Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio)法是一种简单有效的被动源地震勘探方法,当测点下方介质存在明显的速度变化时,HVSR曲线会呈现相应的异常形态。为探索该方法在岩溶区探测地下河管道和溶洞的有效性,选择桂林毛村地下河流域内的大岩前村作为研究区,并在此开展野外试验。研究区发育有一条地下河管道,通过精准的洞穴测量,获得了此地下河管道的平面位置和洞高等信息。在研究区的地下河管道上方地面布设3条物探测线,均进行微动HVSR法测量,并用探地雷达法测量作对比。结果表明,两种物探方法的异常位置与测线下方地下河管道的实际平面位置基本一致,证明微动HVSR法可作为一种有效的地下河管道和溶洞探测方法。

关键词:微动HVSR法;岩溶区;地下河管道和溶洞

中图分类号:P631 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)01-0095-06 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

地球表面时刻存在的微弱振动简称微动,微动信号是一种被动源振动信号,来源于自然界或人类活动,携带丰富的地下地质结构信息^[1-2]。在主动源地震勘探中,微动是一种干扰信号,需要去除,然而此背景噪音也可以用来进行被动源勘探^[3]。微动勘探的优点是场地适应性好,测量简单,并且不需要人工震源。相比使用炸药震源、电火花震源进行地震勘探来说,微动勘探经济且安全。

微动勘探广泛用于天然地震研究,进行地震小区划^[4]或分析场地特性、研究场地放大因子^[5-6]、也可用于烃类储层的探测^[7-8]。如今,微动法更多的是用于探测地下横波速度结构^[9-11]和预测覆盖层厚度^[12-16]。

微动数据采集分为台阵采集和单台采集。台阵采集的微动信号可采用空间自相关法^[17]或频率波数法^[18]提取瑞雷波相速度频散曲线,然后反演得到地下一维横波速度结构^[19]。SPAC法(Spatial Autocorre-

lation method,空间自相关法)需要的台站数量较少,也较为灵活,成为微动台阵提取面波频散曲线的主要方法。单台站观测资料主要采用HVSR法来处理(或称为H/V谱比法),即水平方向和垂直方向振动信号振幅谱的比值^[20]。用SPAC法处理台阵数据时,只需用各观测站的垂直分量,而HVSR法不仅用到垂直分量,还需要两个正交方向的水平分量。微动HVSR的峰值频率与场地卓越频率一致,对应的峰值振幅可作为场地放大系数的下限^[21]。峰值频率的大小由测点处覆盖层的横波速度和厚度决定,可利用钻孔统计信息拟合峰值频率和厚度获得经验公式。当测点下方存在速度倒转时,微动HVSR曲线会在较宽的频带范围内出现低于1的现象,即水平振动信号的振幅谱小于垂直振动信号的振幅谱^[22]。

本文在已知地下河管道上方进行微动HVSR法和探地雷达法测量,对比异常特征,并结合实际管道位置评价微动HVSR法在岩溶区探测地下河管道和溶洞的有效性。

资助项目:中国地质科学院基本科研业务费(YYWF201640);中国地质科学院基本科研业务费(YYWF201643);中国地质调查局地质调查项目(DD20190825);中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费(2017005)

第一作者简介:梁东辉(1990-),男,研究实习生,研究方向:岩溶区微动法探测技术研究。E-mail:dhliang@karst.ac.cn。

收稿日期:2018-01-21

1 方法原理

微动原始测量数据包括三个正交分量的振动数据,即两个水平分量(南北方向和东西方向)和一个垂直分量。因此,微动信号水平分量和垂直分量之比有两个,即 S_{NS}/S_z 和 S_{EW}/S_z ,其中 S_{NS} 、 S_{EW} 及 S_z 分别是南北方向、东西方向及垂直方向的振幅谱。微动HVSr可按照 S_{NS}/S_z 和 S_{EW}/S_z 的算数平均值^[12]、均方根平均值^[13]或几何平均值^[14]来计算,三种方法计算出来的HVSr形态基本一致。按几何平均值计算的公式为:

$$HVSr = \sqrt{\frac{S_{NS} \cdot S_{EW}}{S_z^2}} \quad (1)$$

一个可信的HVSr曲线需要满足以下三个条件^[21]:

- ① $f_0 > 10/l_w$;
- ② $l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$;
- ③ $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$

式中: f_0 为峰值频率; l_w 为时窗长度; n_w 为参与计算的窗口数量; σ_A 为HVSr的振幅标准差。

处理实际微动数据时,选择合适的时窗长度,按时窗长度将数据分成若干段,再分别对每段按照式(1)进行计算,去除干扰较大的数据段,将剩余数据

段的HVSr取平均值,即为此测点的HVSr值,可据此绘制单点HVSr曲线。处理剖面微动数据时,对此测线每个测点的微动数据进行处理,然后绘制此测线的HVSr断面图。通常采样时间不少于20 min,时窗长度不小于20 s。如果要分析0~40 Hz的微动数据,根据尼奎斯特采样定理,采样频率应大于80 Hz。

本文在大岩前村研究区所采集微动数据,采样频率为100 Hz,采样时间30 min,处理时窗长20 s。所使用的探地雷达仪器频带范围为15~105 MHz,中心频率52 MHz。探地雷达向地下发射高频电磁波,信号遇到电性分界面时反射回地面并被接收,故溶洞上方的反射波能量增强。探地雷达的资料经过处理后,能反映出溶洞顶板的埋深,但由于存在多次波,测量数据不能准确地反映溶洞的高度。在存在较大电磁干扰的地区,探地雷达数据会受到影响,可能产生假异常。

2 研究区概况

研究区位于广西桂林市潮田乡大岩前村,距离桂林市区约30 km。研究区发育有一条地下河管道,属于毛村地下河流域。(图1)。流域内出露的地层为中泥盆统应堂组(D_2i)砂页岩,中泥盆统东岗岭组(D_2d)灰岩、白云岩,上泥盆统融县组(D_2r)灰岩和第

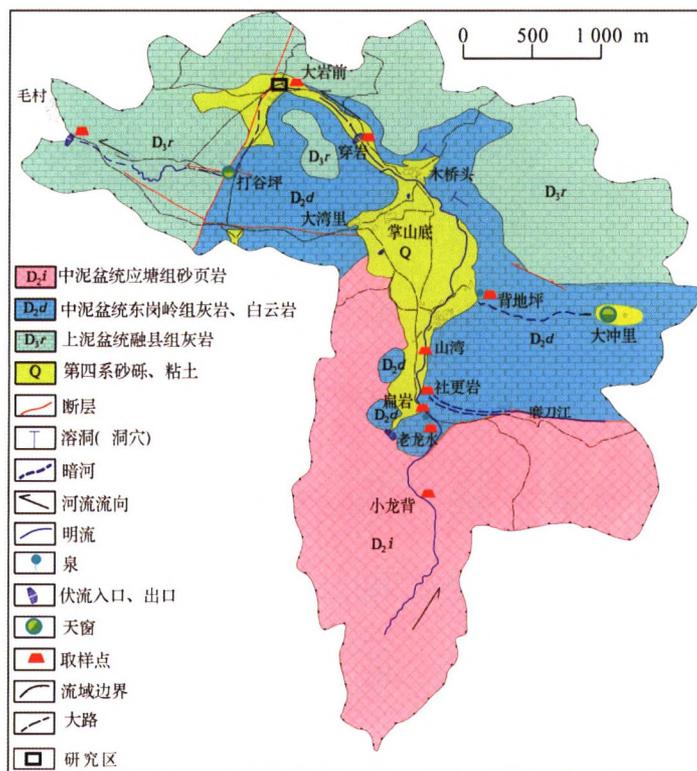


图1 毛村地下河流域水文地质简图^[23]

Fig. 1 Hydrogeological sketch of Maocun underground river basin^[23]

四系(Q)沉积物;构造上主要发育 NNE 向的潮田—大岩前区域断裂及伴生的 NEE 向和 NW 向断裂。地表明流在大岩前村进入地下河管道,流向西南方向,然后在打谷坪转而向东,中间经过一段明流后再次进入地下河管道,最终在毛村地下河出口排出。研究区表层覆盖层较薄,主要成分为残坡积黏土,厚 0~5 m,下伏地层为中泥盆统东岗岭组灰岩,部分区域基岩出露。

3 野外测试及结果分析

3.1 测线布置

研究区内共布置 3 条微动测线(图 2)。w1 线走向 296°,测点点号 0~22 m;w2 线走向 333°,测点点号 0~90 m;w3 线走向 29°,测点点号 11~55 m;地下河管道分布经过精确的地下洞穴测量,平面图如图 2。从图中可以看出,在地下河管道上方的测段为 w1 线的 0~1 m、5~10 m, w2 线的 7~24 m 和 w3 线的 15~35 m。地下河管道埋深 10~20 m,测线与其下方地下河关系见表 1。

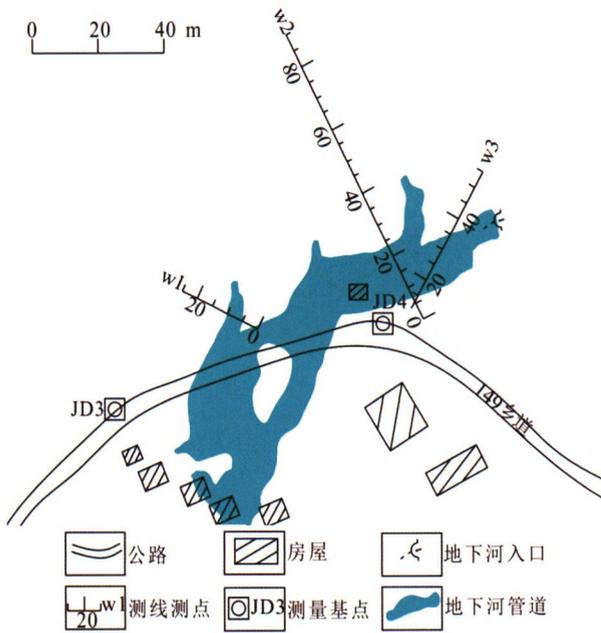


图 2 研究区微动测线布置图

Fig. 2 Layout of microtremor measurement lines in the study area

3.2 异常特征

当微动测点下方存在空洞时, HVSr 曲线会出现异常,表现为部分频率段的 HVSr 曲线小于 1。

在大岩前村地下河管道上方进行单点微动测量,测点处覆盖层为厚 0.5 m 的耕植土。根据洞穴测

表 1 测线及其下方地下河管道位置

Table 1 Measurement lines and location of underground river pipeline

测线	走向/°	点号/m	管道位置/m
w1	296	0~22	0~1, 5~10
w2	333	0~90	7~24
w3	29	11~55	15~35

量结果,测点下方 19 m 为地下河管道,溶洞高 2.2 m。此测点的采样频率为 128 Hz,采样时间 30 min,处理时窗长 20 s,得到的 HVSr 结果如图 3 所示。图中红色曲线表示此测点的 HVSr 曲线,其上方和下方的黑色曲线分别表示 HVSr 加上和减去一倍的标准差,蓝色虚线表示 HVSr=1。此测点微动异常表现为在频率 7~19 Hz 范围, HVSr 曲线低于 1。

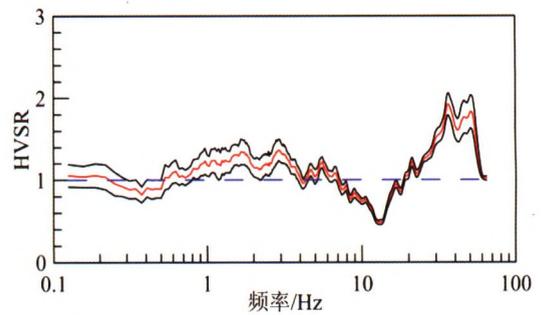


图 3 地下河管道上方微动 HVSr 曲线

Fig. 3 Microtremor HVSr curve above underground river pipeline

在地下车库上方进行微动测量,车库顶板厚约 30 cm,高约 3 m,采样和处理参数与图 3 测点一致,得到的 HVSr 曲线如图 4 所示。此测点的微动异常表现为频率 7~22 Hz 的 HVSr 曲线小于 1。

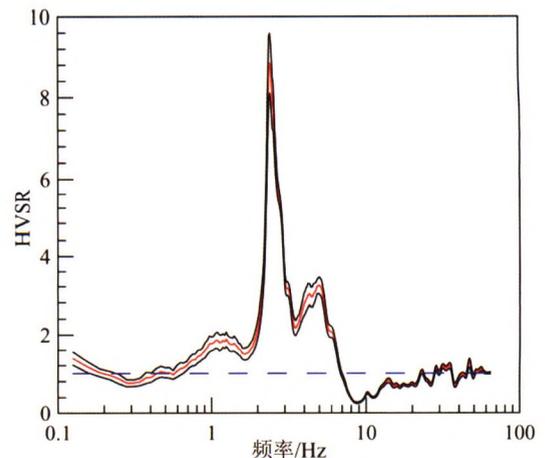


图 4 地下车库上方微动 HVSr 曲线

Fig. 4 Microtremor HVSr curve above underground garage

3.3 测量结果分析

对研究区的3条测线进行微动法测量,并与探地雷达法测量结果做对比,分别对每条测线的测量结果进行分析。

图5为w1线的微动HVSr和探地雷达断面图,可以看出,微动HVSr在0~8 m、11~12 m测段时值小于1,探地雷达的异常段为0~12 m。图6为w1线的地质剖面图,灰色部分表示溶洞,洞顶埋深用探地雷达探测。根据洞穴测量结果,地下河管道位于测线0~1 m、5~10 m测段,溶洞高5.3 m。

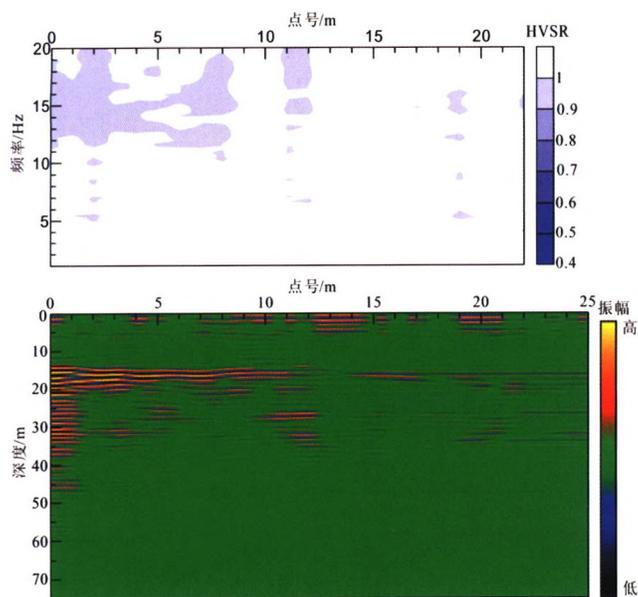


图5 w1线微动HVSr和探地雷达断面图

Fig. 5 Section of microtremor HVSr and ground-penetrating radar along line 5w1

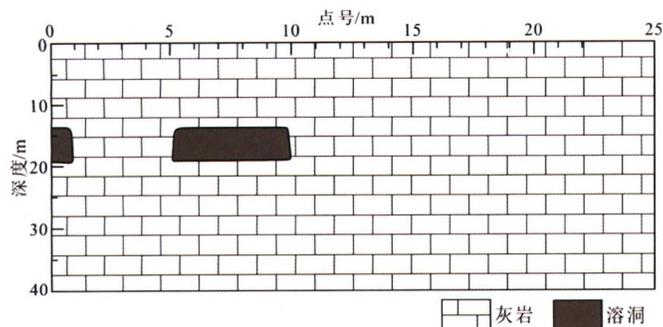


图6 w1线地质断面图

Fig. 6 Geological section of line 6w1

图7为w2线的微动HVSr和探地雷达断面图,从图中可以看出,微动HVSr在0~50 m、60~70 m测段值小于1,探地雷达的异常段为3~10 m、13~24 m、36~50 m、64~67 m。图8为w2线的地质断面图,灰色

部分表示溶洞,洞顶埋深用探地雷达探测。测量结果为地下河管道位于测线7~24 m测段,溶洞高1.8~3.2 m,其中7~13 m测段洞高较小,13~24 m洞高较大。

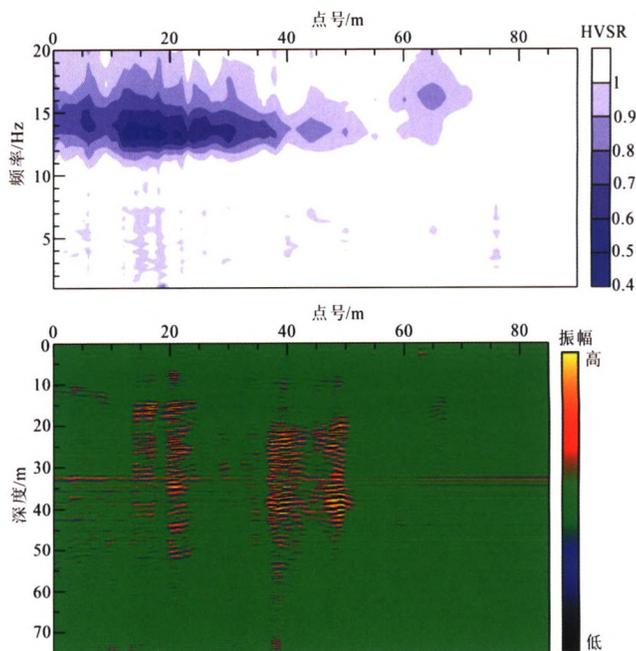


图7 w2线微动HVSr和探地雷达断面图

Fig. 7 Section of microtremor HVSr and ground-penetrating radar along line 7w2

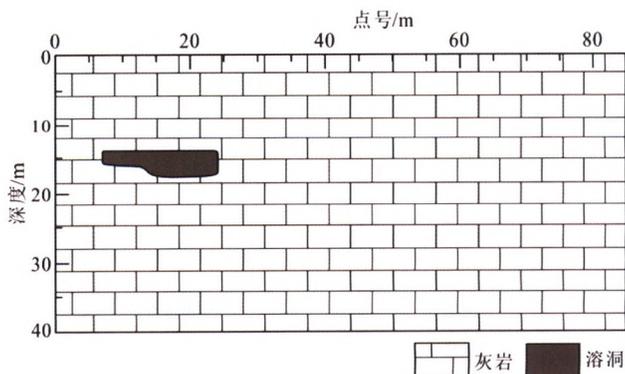


图8 w2线地质断面图

Fig. 8 Geological section of line 8w2

图9为w3线的微动HVSr和探地雷达断面图,从图中可以看出,微动HVSr在11~36 m测段值小于1,探地雷达的异常段为28~33 m、42~51 m。图10为w3线的地质断面图,灰色部分表示溶洞,洞顶埋深用探地雷达探测。测量结果为地下河管道位于测线15~35 m测段,溶洞高1.7~5.0 m,其中15~22 m测段洞高较小,22~35 m洞高较大。

表2为研究区3条微动测线的微动HVSr和探地雷达测量的异常段的汇总。w1线的微动HVSr和探

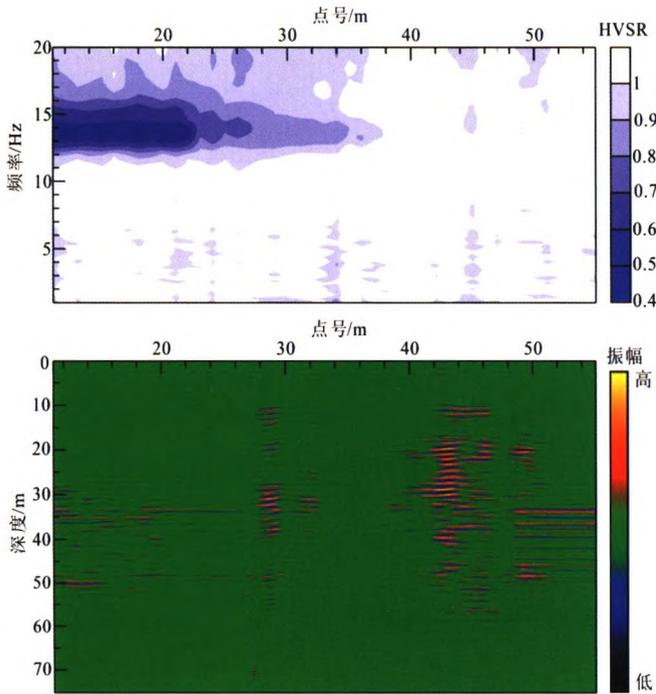


图 9 w3 线微动 HVSR 和探地雷达断面图

Fig. 9 Section of microtremor HVSR and ground-penetrating radar along line 9w3

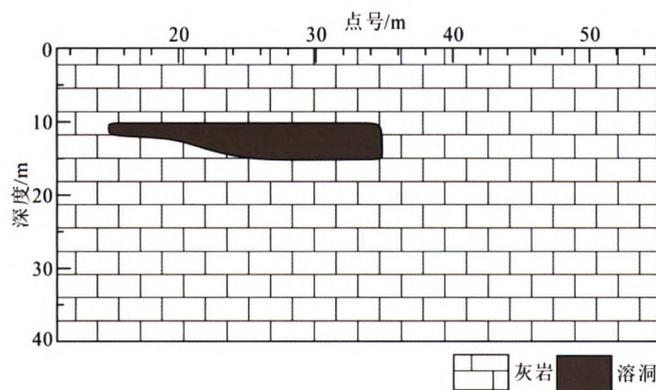


图 10 w3 线地质断面图

Fig. 10 Geological section of line 10w3

地雷达的异常段与地下河管道的平面位置基本一致。w2 线探地雷达除了在地下河管道上方存在异常,在 36~50 m、64~67 m 也有明显异常,推测这两段下方有溶洞发育;微动 HVSR 与雷达异常一致,但异常段要宽一些。w3 线微动 HVSR 异常与地下河管道位置基本一致;探地雷达在 28~33 m 测段存在异常,为地下河管道的响应。42~51 m 测段有较强的雷达异常显示,推测溶洞、裂隙发育,但此测段的微动 HVSR 只在 45 m 测点有异常显示。总体来讲,研究区微动 HVSR 的异常位置与地下河管道的位置基本一致。

当微动测点下方出现速度倒转时, HVSR 在较宽的频带范围出现值小于 1 的异常^[22]。速度倒转有三

表 2 研究区微动 HVSR 和探地雷达的异常段

Table 2 Abnormal segments of microtremor HVSR and ground-penetrating radar in the study area

测线	地下河管道位置/m	微动异常段/m	探地雷达异常段/m	
w1	0~1 5~10	0~8 11~12	0~12	
w2	7~24	0~50 60~70	3~10 36~50	13~24 64~67
w3	15~35	11~36	28~33	42~51

种情况:一是地层本身存在高速层覆盖在低速层上方的情况,如卵石下方有一层黏土或黏土下方有一层淤泥等;二是地下存在空洞;三是表层水泥、沥青、瓷砖等的影响。因此,在进行微动 HVSR 法工作时,要对工区的地质条件有充分的了解,并且尽量避免将测点放置在水泥路面等人工高速层上。另外,在不存在速度倒转的情况下,在两倍的峰值频率附近也可能会出现 HVSR 值低于 1 的情况,但这种异常的频率范围较窄。在进行异常解释时,应注意排除假异常。

4 结 论

在大岩前村已知地下河管道上方进行微动 HVSR 法测量,并与探地雷达的结果进行对比分析,结果表明微动 HVSR 的异常段与地下河管道的位置基本一致,从中可以得到以下结论:

(1) 地下河管道和溶洞上方的微动 HVSR 会呈现值低于 1 的异常特征;

(2) 微动 HVSR 法可以作为一种探测地下河管道、溶洞等地下空洞的有效方法。

参考文献

[1] Okada H, Suto K, Asten M W. The microtremor survey method[M]. 2004.
 [2] 何正勤, 丁志峰, 贾辉, 等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2):492-498.
 [3] 叶太兰. 微动台阵探测技术及其应用研究[J]. 中国地震, 2004, 20(1):47-52.
 [4] Büyüksaraç A, Özcan Bektaş , Yılmaz H, et al. Preliminary seismic microzonation of Sivas city (Turkey) using microtremor and refraction microtremor (ReMi) measurements[J]. Journal of Seismology, 2013, 17(2):425-435.
 [5] Ansary M A, Rahman M S. Site amplification investigation in

- Dhaka, Bangladesh, using H/V ratio of microtremor[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2):559-574.
- [6] Farahani J V, Zaré M. Site characterizations for the Tehran network (TDMMO) in Tehran Region Using Micro-Earthquake, Microtremor and Quarry Blast Data[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2014, 63(3):235-247.
- [7] Steiner B, Saenger E H, Schmalholz S M. Time reverse modeling of low-frequency microtremors: Application to hydrocarbon reservoir localization[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(3): L03307.
- [8] Saenger E H, Schmalholz S M, Lambert M, et al. A passive seismic survey over a gas field: Analysis of low-frequency anomalies[J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): 29-40.
- [9] 王伟君, 陈棋福, 齐诚, 等. 利用噪声 HVSR 方法探测近地表结构的可能性和局限性: 以保定地区为例[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(7):1783-1797.
- [10] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5):1841-1845.
- [11] 刘庆华, 鲁来玉, 何正勤, 等. 地脉动空间自相关方法反演浅层 S 波速度结构[J]. *地震学报*, 2016(1):86-95.
- [12] Seht I V, Wohlenberg J. Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89(1):250-259.
- [13] Delgado J, Casado C L, Estévez A, et al. Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 45(1):19-32.
- [14] Gosar A, Lenart A. Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(3):501-518.
- [15] 张伟, 甘伏平, 梁东辉, 等. 利用微动法快速探测岩溶塌陷区覆盖层厚度[J]. *人民长江*, 2016, 47(24):51-54.
- [16] Liang D, Gan F, Zhang W, et al. The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6):259.
- [17] Aki K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors [J]. *Bull. earthquake Res. inst. tokyo Univ*, 1957, 35:415-456.
- [18] Capon J. Applications of detection and estimation theory to large array seismology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(5):760-770.
- [19] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. *物探与化探*, 1986, 10(2):123-133.
- [20] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [J]. *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports*, 1989, 30(1):25-33.
- [21] SESAME. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation [R]. SESAME European research project, 2004.
- [22] Castellaro S, Mulargia F. The Effect of Velocity Inversions on H/V[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2009, 166(4):567-592.
- [23] 黄芬, 唐伟, 汪进良, 等. 外源水对岩溶碳汇的影响: 以桂林毛村地下河为例[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4):417-421.

Study on the effectiveness of the microtremor HVSR method in detecting underground river pipelines and caves in karst areas

LIANG Donghui, GAN Fuping, ZHANG Wei, HAN Kai

(*Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract The Microtremor HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) method is a simple and effective tool in passive-source seismic exploration. When a significant change of velocity of the medium below the measuring site is present, the HVSR curve can exhibit corresponding abnormal shapes. The purpose of this work is explore the effectiveness of this method in detecting underground river pipelines and caves in karst areas. At the Dayanqian village in the Maocun underground river basin, field experiments were carried out, where exists an underground river pipeline exists. The plane position and cave height of this pipeline were determined by precise cave measurement. Three geophysical survey lines were arranged on the ground over the underground river pipeline in the study area, all of which were measured by the microtremor HVSR method and compared by the ground-penetrating radar measurement. The result shows that the anomaly position by the two geophysical methods are basically consistent with the actual plane position of underground river pipeline below the survey lines, which proves that the microtremor HVSR method can be used as an effective tool in the detection of underground river pipelines and karst caves.

Key words microtremor HVSR method, karst area, underground river pipeline and karst cave

(编辑 张玲)