

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007066

隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究 ——以武汉市为例

何军¹, 刘磊², 黎清华¹, 刘道涵¹, 陈标典³, 张傲¹, 赵永波¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205; 2. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北武汉 430056; 3. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉 430034)

摘要: 岩溶地面塌陷是城市隐伏岩溶区地下空间开发过程中常见的地质环境问题, 具有隐蔽性和突发性, 开展隐伏岩溶区地下空间结构探测技术方法研究可以有效指导地下空间开发利用。以武汉市为例, 分析武汉市岩溶地面塌陷的成因机理, 提出岩溶发育程度、覆盖层厚度和结构、地下水是岩溶地面塌陷的原生地质条件, 也是隐伏岩溶区地下空间探测的特征因子。通过对比分析地质雷达、高密度电阻率法、浅层地震、微动、混合源面波、瞬变电磁法、孔间层析成像和地面核磁共振法等技术方法在武汉市隐伏岩溶区地下空间探测的适用性。结果表明: 地质雷达适用于浅部土层扰动探测, 小极距的高密度电阻率法和混合源面波适宜于覆盖层的厚度和结构探测, 浅层地震、微动和孔间层析成像适宜岩溶发育特征探测, 地面核磁共振法可通过岩溶地下水的富水性辅助岩溶发育程度探测。

关键词: 隐伏岩溶区; 地下空间; 武汉市; 地面塌陷

中图分类号: P642.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0047-10

Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example

HE Jun¹, LIU Lei², LI Qinghua¹, LIU Daohan¹, CHEN Biaodian³, ZHANG Ao¹, ZHAO Yongbo¹

(1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China; 2. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan, Hubei 430056, China; 3. Geological Environmental Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: The concealed and sudden karst collapse is the one of common geological environmental problems in the utilization of underground space in urban hidden karst areas. Research on the detection technology and methods of underground space structure in hidden karst areas may guide the utilization of underground space effectively. The degree of karst development, thickness and structure of the overburden, groundwater were proposed to be the primary geological conditions of karst collapse, which were characteristic factors of underground space exploration in hidden karst region, on the basis of analyzing the cause mechanism of karst collapse in Wuhan. The applicability of detecting underground space in hidden karst region was compared with ground penetrating radar, high density resistivity, shallow seismic, microtremor, multi-source surface wave, transient electromagnetic cross-hole computerized tomography and surface nuclear magnetic resonance. The results show that ground penetrating radar is suitable for detecting shallow soil disturbances. Both high density

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190282)

第一作者: 何军 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境地质调查评价工作。E-mail: 05302105hj@163.com

通讯作者: 黎清华 (1978-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质与环境地质调查研究工作。

E-mail: tsinghua_li@126.com

resistivity with small polar distance and multi-source surface wave are suitable for detecting the thickness and structure of the overburden. The shallow seismic, microtremor and cross-hole computerized tomography are suitable for detecting characteristics of karst development. Surface nuclear magnetic resonance can be used to evidence the degree of karst development through water abundance of karst groundwater.

Keywords: hidden karst region; underground space; Wuhan; karst collapse

我国岩溶分布较广,岩溶区受自然和人为作用影响易发生岩溶地面塌陷,隐伏岩溶区地面塌陷具隐蔽性和不确定性,城市地下空间开发建设中,溶沟、溶槽、溶洞、暗河等不良地质现象对地下空间影响巨大^[1-4],易发生突水突泥事故,造成人员伤亡。众多学者从工程地质角度对岩溶地面塌陷机理和地下空间适宜性评价等开展研究^[5-9],但这些研究均需要基于隐伏岩溶区地下空间结构和地质条件的精准刻画,因此岩溶地质结构的精确探测技术是工程和学术界十分重视的研究方向。目前,岩溶地面塌陷调查主要是岩溶地质和水文地质调查,采用的手段以探地雷达^[10]、高密度电阻率法^[11-12]、瞬变电磁法^[13]、浅层地震^[14]、可控音频大地电磁深 CSAMT^[15]、层析成像^[16]、微动等单一方法^[17],或是多方法组合探测和钻探^[18-19]。钻孔取芯不仅耗费大量人力物力,还会增加岩溶塌陷的可能性,因此地球物理为主,辅以钻探验证是目前主要的岩溶探测方法。但地球物理方法对隐伏岩溶的探测还存在诸多难点,需要根据不同的探测目的选择不同的方法组合。

武汉、广州、长沙、桂林等城市的地下空间开发均面临岩溶特殊地质问题,其中武汉具有代表性^[4]。武汉市岩溶地面塌陷始发于 1931 年,截至 2018 年先后发生 33 处(38 次)岩溶塌陷(图 1),形成塌陷坑 96 个。武汉市隐伏岩溶区地下空间研究多局限于城市轨道交通^[20-21],探测技术方法研究较少且手段较为单一^[22]。本文以武汉市为例,分析岩溶地面塌陷成灾机理,确定隐伏岩溶探测的特征因子,采用多种地球物理探测方法组合,对白沙洲和法泗工作区分别开展建成区和新城区的岩溶探测,对比研究各种方法对特征因子的适用性,形成一套适用于隐伏岩溶区地下空间探测的技术方法体系。

1 武汉市岩溶地质条件

1.1 可溶岩分布

武汉市以剥蚀垄岗地貌和冲湖积平原地貌为主,地表广泛分布第四系松散堆积层,下伏基岩地层包括中志留统、上泥盆统、下石炭统、中二叠统及上白垩—

古新统,其中在中志留—中三叠时期扬子准地台处于滨海、浅海及开阔海台地沉积环境,经过晚古生代和中生代早期的两次海进-海退旋回,形成了四套碳酸盐岩地层,主要为嘉陵江组白云质灰岩、灰岩夹白云岩、大冶组灰岩、栖霞组燧石结核灰岩、黄龙-船山组厚层灰岩。碳酸盐岩地层中钻孔遇洞率由大到小依次为黄龙组和船山组、栖霞组、嘉陵江组和大冶组,钻孔平均线岩溶率由大到小依次为栖霞组、黄龙组和船山组、嘉陵江组和大冶组,且嘉陵江组和大冶组中平均线岩溶率远小于另外两种。另外,岩溶在水平方向上的分布与断层发育密切相关,距断层线越近岩溶发育越强烈。两种岩性的交界处,尤其是可溶岩与非可溶岩的交界处,岩溶较为发育。

武汉市可溶岩以隐伏为主,总体呈近东西向条带状分布,局部地区由于受构造影响岩溶条带发生折曲,条带宽度一般为 0.8 ~ 6.8 km,最宽可达 12 km,隐伏可溶岩分布总面积约 1 091.51 km²,占武汉市总面积的 12.74%。受构造和地形控制,隐伏可溶岩主要位于向斜核部,少数位于向斜翼部,区内由北至南主要呈 8 条隐伏岩溶条带(图 1)。岩溶发育主要以浅层、小型、全充填的溶洞居多,岩溶发育程度由北向南逐渐增强,垂向上基岩面以下 1 ~ 4 m 为岩溶强烈活动区,基岩面 10 ~ 20 m 以下岩溶活动相对较弱。

1.2 第四系土层特征

武汉市发育多级及多种类型的阶地^[23],地表第四系厚度一般为 20 ~ 40 m,最厚达 60 m。武汉市岩溶埋藏条件为覆盖型和埋藏型。前者的碳酸盐岩被第四系松散堆积物覆盖,后者被白垩-新近系砂岩或砾岩覆盖,一般地表裸露型岩溶区岩溶现象不发育,且不易发生岩溶地面塌陷。岩溶地面塌陷主要发生在覆盖型岩溶区,上部覆盖层主要为单层结构及“上黏下砂”双层结构,局部地区为多层结构。单层结构的隐伏岩溶区面积约 947 km²,分布于长江三级阶地的垄岗区,出露高程为 25 ~ 30 m,主要为单层黏性土,大部分为第四系中更新统网纹状黏土,含铁锰薄膜,厚度一般 15 ~ 30 m,最厚可达 60 ~ 70 m。少量单层结构为全新统冲积中粗砂、粉细砂。双层结构分布于长江一级阶

地,厚度 25 ~ 30 m,一般上部为粉质黏土,下部为粉砂、细砂和砾砂,分布面积约 124 km²,极少数为“上砂下黏”。

1.3 水文地质特征

孔隙水主要来源于长江水的侧向补给,少量为降雨入渗,汛期阶地前缘水位高于后缘,枯水期则相反。岩溶裂隙水接受相邻含水层的越流补给,与长江等地表水没有直接互补关系。在长江、汉江一级阶地的局

部地区,全新统孔隙承压水含水岩组,直接覆盖于碳酸盐岩裂隙岩溶水含水岩组之上,裂隙岩溶水与全新统孔隙承压水呈互补关系。大部分地区二者之间存在较薄的含碎石黏土相对隔水层,一旦揭穿相对隔水层,上覆松散层孔隙水和岩溶裂隙水之间形成直接水力联系。武汉市临江地段易发生岩溶塌陷,主要原因是地下水与长江水具有明显的水力联系,地下水位波动较强,岩溶易发育。

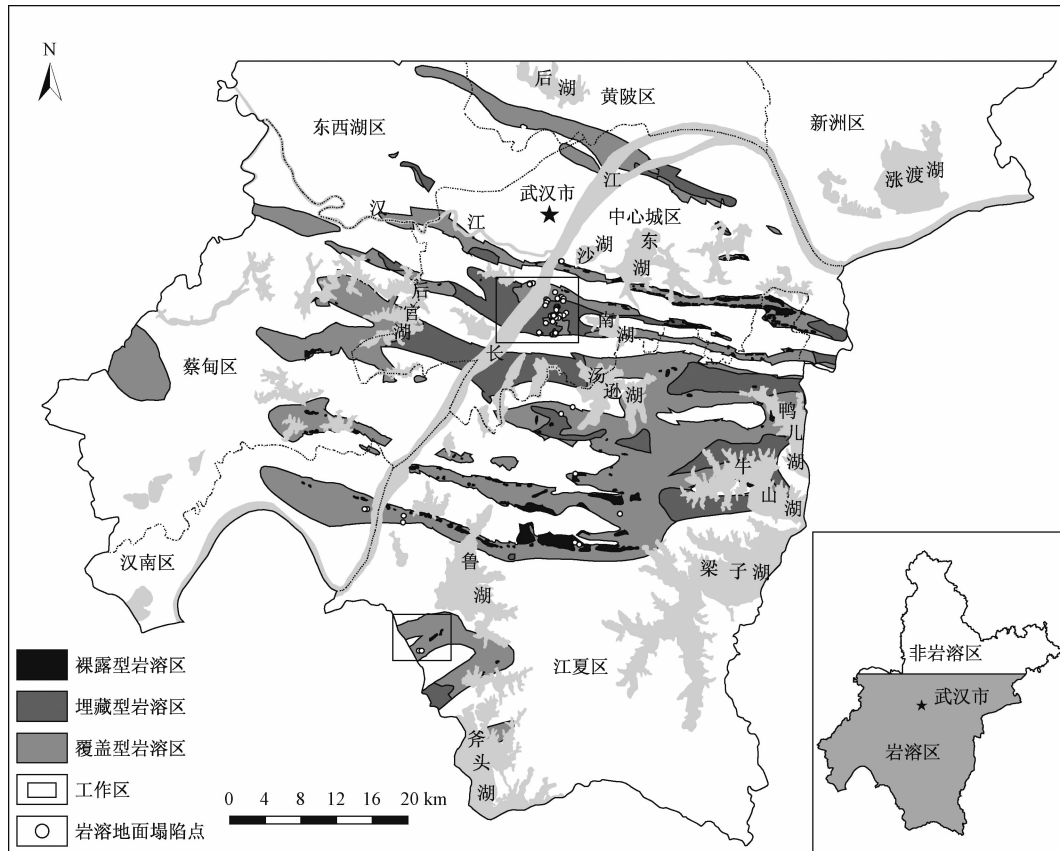


图1 武汉市岩溶塌陷和隐伏可溶岩分布图

Fig. 1 Distribution of karst collapses and rock in Wuhan

2 武汉市岩溶塌陷机理及特征因子

武汉市岩溶塌陷的实质是土体塌陷,根据土体受力后塌陷过程中土颗粒的运移方式,即黏土块体塌落、砂颗粒流失,将塌陷机理分为土洞型和沙漏型2种(图2)。土洞型塌陷主要发生在单层黏性土中,沙漏型塌陷发生在“上黏下砂”的双层结构中。从地表出露的溶蚀现象看,岩体内的溶蚀裂隙比大的溶洞发育密度大很多,在裂隙附近存在多个初始的土洞,它们在潜蚀作用下扩大,并相互连接,形成具有一定规模的土洞。当下伏可溶岩裂隙逐渐溶蚀演变成开口大的溶洞时,潜蚀作用和应力集中作用同时发生,随着地下水流

动,土洞的发展方向以向上扩展,坍塌下来的土体堆积在土洞底部被地下水带入溶蚀孔洞中,在外界因素诱发或土洞顶板继续变薄时,四周摩擦力不能平衡土洞顶板,顶板迅速塌落形成土洞型塌陷。沙漏型塌陷是由于下伏可溶岩的溶蚀裂隙、落水洞等为砂性土颗粒的漏失提供通道和储存空间,在外部因素的诱发下,砂颗粒逐渐漏失,形成初步的沙漏土洞。随着砂漏失量的增大,在自重、荷载等作用下,土体失稳垮塌,形成沙漏型塌陷。

由武汉市岩溶地面塌陷的形成机理可知,岩溶塌陷产生的地质背景包括空间条件、物质条件和水动力条件^[24-25]。空间条件是地下水和塌陷物质存储的岩

溶裂隙和溶洞,即岩溶发育程度,与地质构造和岩石的化学成分有关。物质条件主要是指覆盖层结构,包括土层厚度和岩性特征。水动力条件是指诱发地面塌陷的自然因素和人为因素,包括地下水动态变化、过量开采和工程施工等。

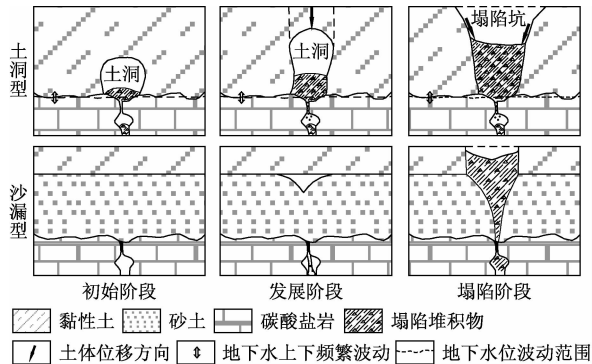


图2 武汉市岩溶塌陷机理

Fig. 2 Mechanism of karst collapses in Wuhan

武汉市岩溶裂隙和溶洞较发育、覆盖层厚度小于30 m、覆盖层具有“上黏下砂”二元结构以及地表水和地下水相互作用较强烈的区域是武汉市岩溶地面塌陷最易发生的位置。因此,武汉市隐伏岩溶区地下空间探测应重点关注的特征因子为隐伏岩溶区边界、可溶岩地层岩溶发育程度、覆盖层厚度、覆盖层土层结构、地下水位变幅等。由于地下水位变幅需要通过长期的水文地质观测确定,本文重点讨论地球物理探测其他特征因子的方法。岩溶地下水均赋存与岩溶通道内,故岩溶裂隙水的富水性也可以用来佐证可溶岩的破碎程度。

3 隐伏岩溶区地下空间探测

3.1 隐伏岩溶区边界探测

分布有隐伏岩溶的地下空间开发利用时,首先要解决的问题是圈定可溶岩的分布范围,通常第四系较松散,表现为相对低阻,泥岩、页岩和砂岩等电阻率也较低,而灰岩和白云岩较致密,表现为相对高阻。因此,可以利用可溶岩与非可溶岩两者之间的电性差异判定。以第三岩溶条带的锦绣长江地区为例,布设一条与地铁6号线平行的高密度电阻率法剖面线,电缆总长1 200 m,电极距10 m,探测深度大约160 m,结果如图3所示。从高密度长测线电阻率反演图中,可以看出:该测线整体电阻率特征分成两层,上部低阻层和下部高阻层。上部低阻层推测为第四系土层,900 m之后第四系土层厚度明显增加。下部高阻层推测为灰

岩,但在下部高阻层中存在一处明显的低阻异常,结合测线西北约500 m处地铁6号线钻孔剖面图(图3b),推测该低阻异常为泥岩、页岩,其宽度约100 m,在后续的钻孔验证也得到了证实。因此,大极距的高密度电阻率法测量可有效用于可溶岩和非可溶岩界线的确定,从而快速圈定隐伏岩溶区的范围和上覆土层的厚度,但是对于土层结构和岩溶发育程度的刻画分辨率较低。

3.2 岩溶发育程度探测

岩溶发育程度是岩溶地面塌陷的主要原因,也是隐伏岩溶区地下空间探测的难点,本文主要探讨利用微动、浅层地震、电磁波层析成像(CT)、反磁通瞬变电磁法等探测岩溶发育程度。

3.2.1 微动

微动是一种采用台阵观测天然振动信号的地球物理方法,微动S波速度能较准确、直观地反映地层岩性变化及异常体形态、规模^[26],溶洞或其充填物的波速远低于周边完整围岩的波速,表现为高速地层中存在明显低速异常区,从而推断岩溶发育部位。

毛坦港典型塌陷区在1999年发生过岩溶塌陷,位于毛坦港小学北东约50 m处,塌陷坑直径达到18 m。为研究微动对于岩溶发育程度的探测效果,布设一条长度为140 m的测线,采用三重圆台阵进行测量。结果显示横波速度整体从上到下逐渐升高,大致可以分为4个速度层(图4),以18,25,50 m左右深度为分界线,推测上部低速层为第四系地层反映,其厚度约在25 m左右;下部高速层推测为灰岩的反应。在高速层中存在多个低速异常区,推测这些低速区可能为岩溶发育区,分别位于920点、940点、990点和1030点处,异常位置主要集中在埋深30~60 m之间,多数呈现水平层状分布。通过钻孔验证,上部第四系松散层厚度约25 m,部分位置略有差异,对应微动上部第一、二速度层。钻孔ZK-CT1在埋深28.5~33.0 m发育直径约5 m的半充填溶洞,钻孔ZK-JC2在埋深53.9~60.0 m发育直径约6 m的无充填溶洞。结果表明,微动对于隐伏岩溶区土层厚度及分层具有较好的效果,同时溶洞发育位置与微动探测低速异常中心一致。

3.2.2 大极距高密度电阻率法和浅层地震

浅层地震测量是由人工激发的地震波向地下介质传播时,在不同波阻抗界面产生反射现象进行岩溶探测的技术。当反射波频率降低,能量增强,速度降低等特征,推测为构造破碎带或溶洞^[27]。

烽火村及其附近从1997年至2005年先后共发生

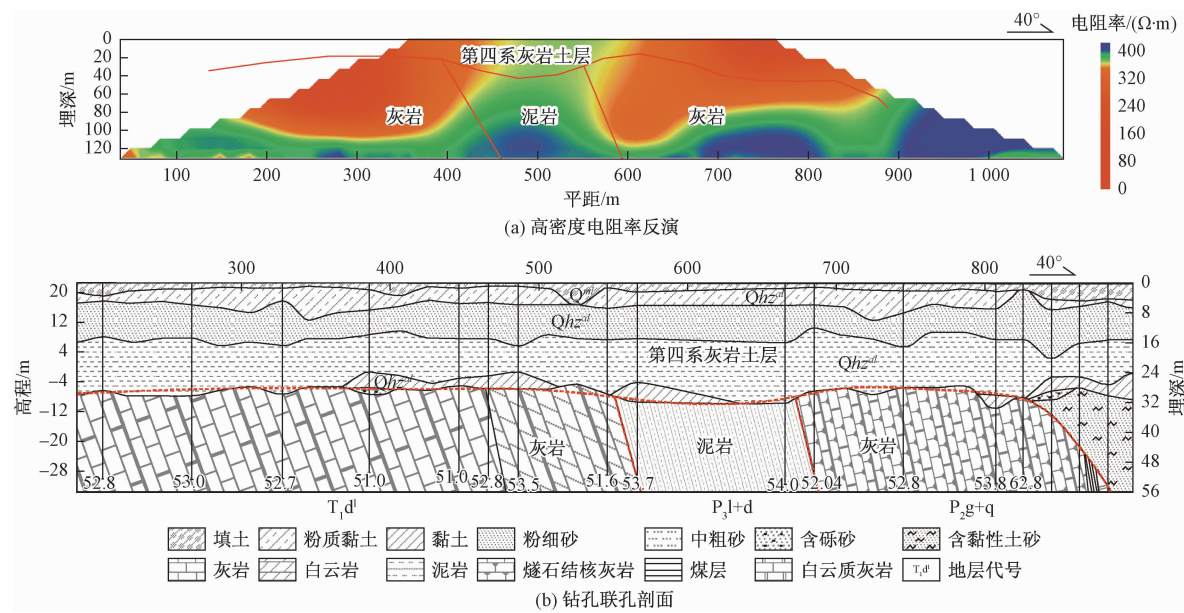


图 3 锦绣长江高密度电阻率反演和钻孔剖面图

Fig. 3 Inversion of high density resistivity and boreholes cross-section in Jinxiuchangjiang

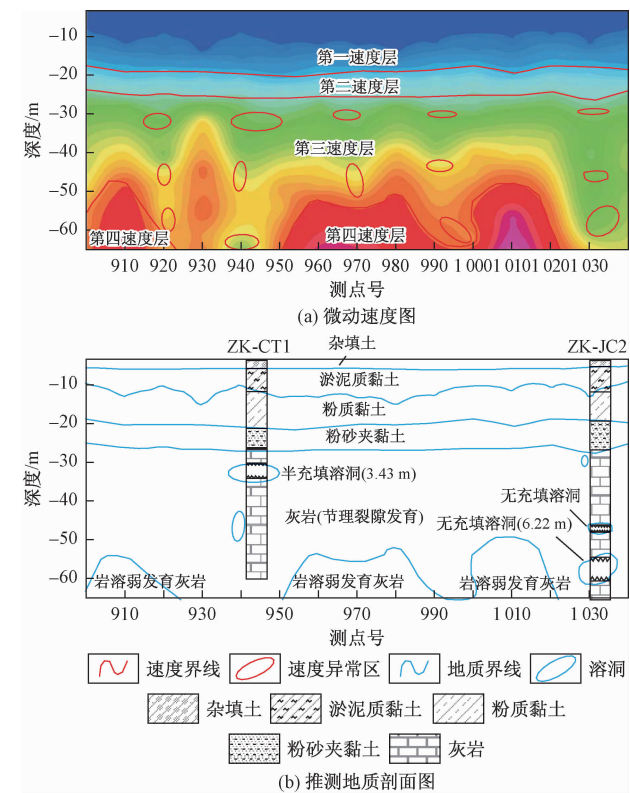


图 4 毛坦港岩溶区微动速度与推断地质剖面图

Fig. 4 Microtremorspeed and inferred geological cross-section in Maotangang

多次塌陷,以 2000 年 4 月塌陷规模最大,共计形成塌陷坑有 19 处之多^[1]。在塌陷点附近布设了高密度电阻率法、浅层地震、孔间电磁波 CT 和反磁通瞬变电法

综合剖面。高密度电阻率测线长度 200 m,反演结果显示整体电性特征分成 2 层,上部高阻层和下部低阻层,在 80 ~ 100 m 之间下部低阻层中存在 1 处高阻异常区(图 5a),推测可能为上部土层扰动进入到下部岩溶裂隙导致(图 5e)。地震结果显示在 75 ~ 100 m 之间存在 1 处强反射异常(图 5b),与高密度电阻率法测量结果较一致。但上述方法对内部岩溶发育细节的表征较为模糊且近地表信息缺失或分层不清晰,表明大极距高密度电阻率法和浅层地震可用于初步判断岩溶发育程度,对于上部土层厚度和结构的分辨能力有限。

3.2.3 电磁波层析成像

电磁波 CT 是利用电磁波在不同的介质中传播时吸收存在差异来推断目标地质体的结构和形状^[28],如充填溶洞、破碎带等的吸收系数比其周围的完整岩石吸收系数要大很多,在电磁波 CT 剖面上,低吸收率中间的高吸收率异常区,可推断为岩溶发育区或裂隙发育区。岩溶、溶蚀裂隙及破碎岩体等不良地质岩体与完整岩体之间存在明显的电阻率差异,具备反磁通瞬变电磁法测试的地球物理前提条件^[29]。

在施工完 CT5 和 CT6 两个钻孔进行验证后,进行了电磁波 CT 探测(图 5c),结果显示在第四系之下,埋深 30 ~ 36 m 之间存在高吸收区,钻孔显示表层溶蚀、溶槽较发育;剖面下部两孔之间高吸收率异常相互连接,表明此处溶洞相互之间联通性较好,且在靠近 CT5 存在一处与表层溶蚀区联通的溶蚀裂隙。该方法可精细分辨岩溶发育程度,但需要借助钻孔,且孔间距需小

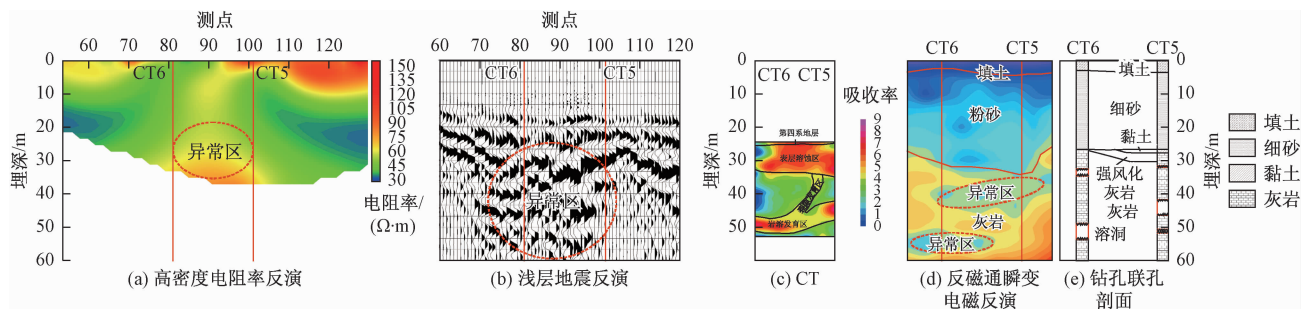


图5 烽火村综合物探解译与钻孔剖面图

Fig. 5 Comprehensive geophysical prospecting and boreholes cross-section in Fenghuo village

于 25 m,只适用于小尺度场地调查。

3.2.4 反磁通瞬变电磁法

反磁通瞬变电磁法结果显示该地区覆盖层电阻率较低,其与基岩电阻率差异明显、界线分明,覆盖层厚度 20~30 m(图 5d)。下伏高阻基岩中存在两处低阻区域。与钻孔对比表明该方法对于岩溶较发育地带带有显示,但分辨率较低,只能探测规模性的岩溶。

3.3 覆盖层厚度和结构探测

覆盖层的厚度和结构是武汉市岩溶地面塌陷的物质条件,由于覆盖层具有总厚度和单层厚度小、扰动性大的特点而难以有效的探测。前文已探讨了几种地球物理方法对覆盖层的探测,大致可以探明覆盖层的厚度,对于土层结构仅有微动的探测效果较好。地质雷达、小极距高密度电法和混合源面波技术均适宜于浅表层的探测,可用于探测土层扰动和结构分层。

3.3.1 地质雷达

当遇到地质雷达图像和波形特征表现为许多双曲线强反射波组成^[30]。土层扰动会形成一系列大小不一的孔隙,其因充水、空气等,与周围土体会形成明显的介电常数差异特征,形成较强的反射、散射等,在雷达探测图像上,会出现强烈的反射异常区或一系列的小弧形反射区。在法泗街塌陷坑处的雷达图像中可以看出土层扰动(介质不均匀)的雷达图像特征为彩色条纹不连续(图 6),局部伴有小的弧形反射,塌陷处雷达图存在多次反射,且反射界面有较强的反射信号。这表明地质雷达对于隐伏岩溶区土层扰动具有较好的探测效果,扰动越大,信号越强。但该方法的探测深度有限,受表层物质影响大,水、杂填土都影响探测深度及效果,一般不超过 25m,且易受干扰。

3.3.2 小极距高密度电阻率法

前文在讨论高密度电阻率法在隐伏岩溶边界探测时采用的是 10 m 的极距,对于覆盖层的厚度可以大致探明,但对覆盖层的分层结构却无法准确地探测,而该

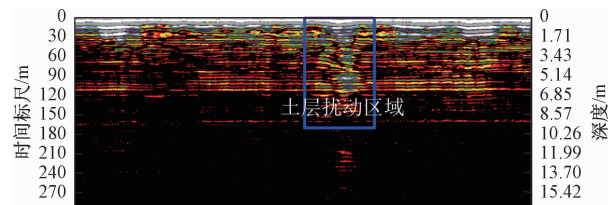


图6 法泗街岩溶塌陷区地质雷达图

Fig. 6 Geological radar data of karst collapse in Fasi

方法的垂向分辨率与极距的大小有关,小极距更适宜于浅部覆盖层结构探测,而探测的深度也随之减小。在法泗岩溶区开展不同极距高密度电法探测对比研究,用 2,5,10 m 极距在同一位置进行测量(图 7),结果显示探测深度随着极距的减小而减小,但上部覆盖层的结构随着精细,下部基岩面的形态也越发清晰。表明高密度电法采用小极距适宜覆盖层结构的探测,大极距适宜覆盖层厚度的探测。

3.3.3 混合源面波

混合源面波勘探主要指利用主动源激发的面波法与利用被动源的面波法进行同一场地浅层地质结构的调查方法,主动源对几十米以内深度分辨力较高,且具有一定的横向分辨力,被动源勘探深度大于主动源,被动源联合应用,有助于提高勘探深度并与主动源勘探有同样的精度^[31]。法泗岩溶区主动源和被动源混合面波与高密度电法剖面联合探测,结果显示混合源面波对于上部覆盖层具有双层结构,结合钻孔资料推断为“上黏下砂”的二元结构,分层界线清晰可见,原塌陷区形成的黏性土漏斗较明显,下部基岩面的起伏也较清晰,但对碳酸盐岩的岩溶发育程度反演还需要进一步研究。因此,混合源面波适宜武汉隐伏岩溶区土层厚度和结构的探测。

3.4 地下水探测

地面磁共振测深直接对地下水进行探测,能够识别岩溶裂隙地下水的含水量、有效孔隙等参数,从而间

接反映岩溶发育程度。在法泗地区塌陷坑内(图 8a)和塌陷坑外(图 8b)对比试验表明,该地区 20 m 以上含水层水量大于下部,推断上部为孔隙水,且下部的孔隙大于上部,推迟覆盖层为“上黏下砂”的二元结构,下部为岩溶裂隙水。塌陷坑内埋深 30 m 左右深度岩溶裂隙较发育,含水体积比约为 30%,弛豫时间 $T2^*$ 约 20 ms(图 8a),有效孔隙尺寸小,推测为向运移的粉细砂塌陷物质充填所致。塌陷坑外埋深 35 ~ 50 m 段

内岩溶裂隙发育,弛豫时间 $T2^*$ 约 50 ms(图 8a),有效孔隙尺寸较塌陷坑大,但其含水体积比却小于 10%,这是由于覆盖层与碳酸盐岩接触界面处岩溶不发育,渗透性较差,地下水难以渗透至下部岩溶裂隙中,导致含水量小,这也是该处未发生岩溶塌陷的原因。因此地面磁共振测深可以通过探测松散岩类孔隙水和岩溶裂隙水的含水量间接佐证覆盖层厚度、结构和岩溶发育程度。

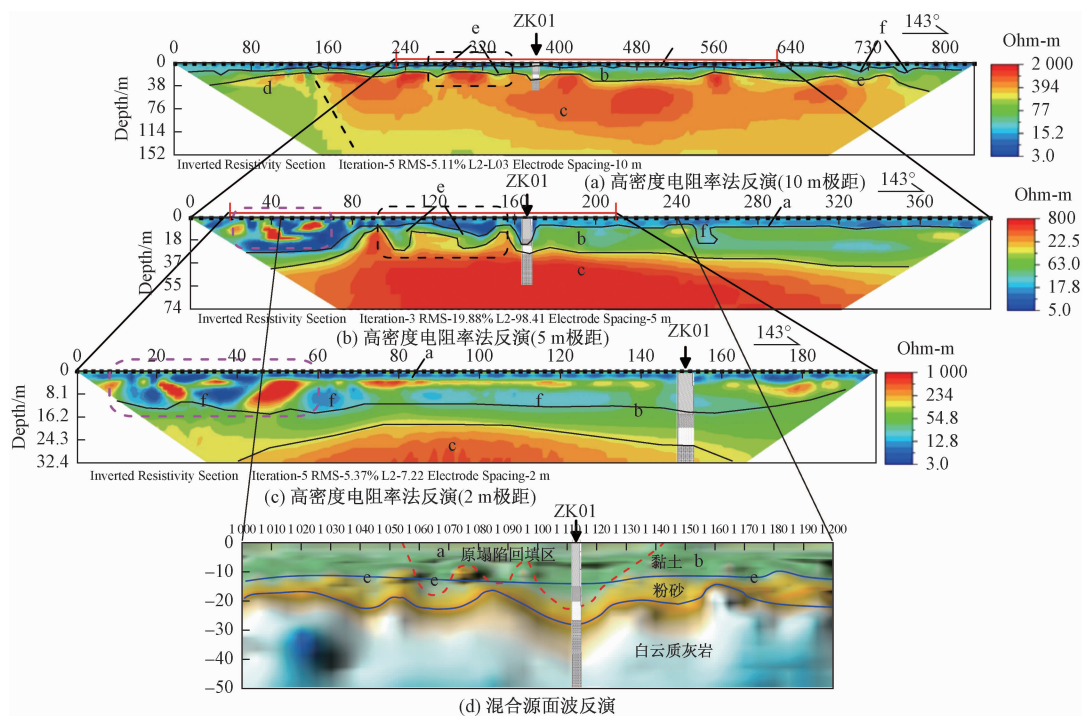


图 7 法泗混合源面波和不同极距高密度电阻率法探测解译图

Fig. 7 Multi-source surface wave exploration and high-density resistivity with different electrode distance results in Fasi

a—黏土层;b—细砂层;c—碳酸盐岩;d—砂岩;e—基岩起伏或溶洞;f—土层扰动

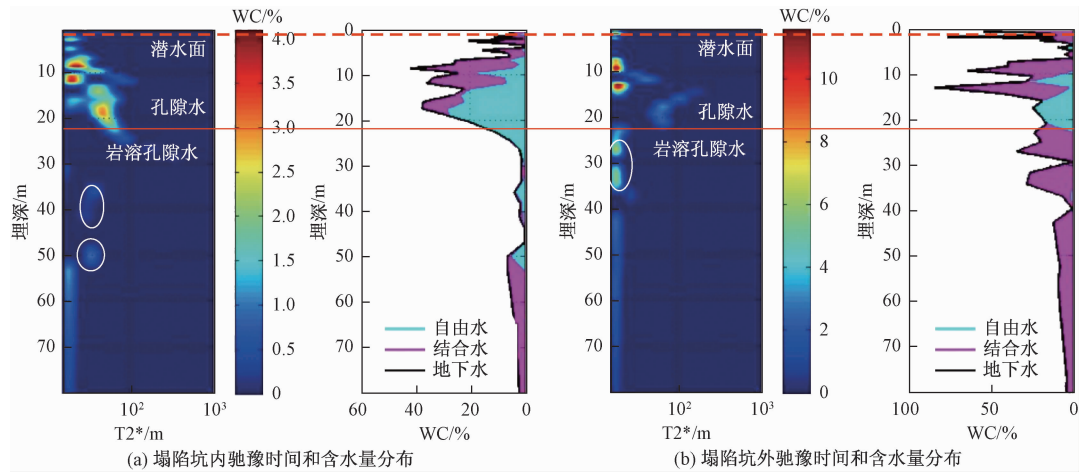


图 8 法泗街地面磁共振解译图

Fig. 8 Surface nuclear magnetic resonance prospecting of karst collapse in Fasi

4 结论

以武汉市为例,对比分析地质雷达、高密度电阻率法、微动等多种地球物理探测方法对隐伏岩溶区地下空间各特征因子的探测效果,结论如下:

(1)隐伏岩溶区地下空间探测的特征因子为隐伏岩溶区边界、可溶岩地层岩溶发育程度、覆盖层厚度、覆盖层土层结构和地下水位变幅。

(2)隐伏岩溶区边界和区域尺度隐伏岩溶区的分布范围的确定适宜采用大极距的高密度电阻率法测量,同时也能初步确定覆盖层的厚度和碳酸盐岩的岩溶发育程度,但对覆盖层的结构特征探测效果不明显。

(3)岩溶发育程度可以采用大极距高密度电阻率法、浅层地震、微动、电磁波层析成像和反磁通瞬变电磁法等方法。其中大极距高密度电阻率法和浅层地震还可以大致探明覆盖层的厚度;微动对于岩溶发育程度、土层厚度及分层均具有较好的效果;电磁波层析成像适宜小场地的精细化探测;反磁通瞬变电磁法对覆盖层厚度和结构具有一定的探测效果,但在岩土界面浅部会形成盲区,适宜规模性岩溶的探测。

(4)土层厚度和结构宜采用小极距的高密度电阻率法和混合源面波进行探测。地质雷达对于隐伏岩溶区土层扰动具有较好的探测效果,地面磁共振测深可以通过探测类孔隙水和岩溶裂隙水的含水量佐证覆盖层厚度、结构和岩溶发育程度。

参考文献 (References):

- [1] 胡亚波,刘广润,肖尚德,等.一种复合型岩溶地面塌陷的形成机理——以武汉市烽火村塌陷为例[J].地质科技情报,2007,26(1):96-100. [HU Y B, LIU G R, XIAO S D, et al. Mechanism of a compound karst surface collapse: a case study in Fenghuo village of Wuhan City[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(1):96-100. (in Chinese)]
- [2] 卢伟,杨荣丰,朱晓青,等.湖南湘潭某岩溶地面塌陷特征及成因分析[J].华南地质与矿产,2018,34(3):229-235. [LU W, YANG R F, ZHU X Q, et al. Analysis on the characteristics and cause of a karst ground collapse in Xiangtan, Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2018, 34(3):229-235. (in Chinese)]
- [3] 陈学军,周明芳,陈富坚,等.岩溶地区破坏性抽水致塌试验研究——以广西桂林西城区为例[J].

- 地质科技情报,2002,21(1):79-82. [CHEN X J, ZHOU M F, CHEN F J, et al. Destructive pumping test to study the characteristics of karst collapses in limestone region: A case study in the western urban of Guilin city[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1):79-82. (in Chinese)]
- [4] 黄强兵,彭建兵,王飞永,等.特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J].地学前缘,2019,26(3):85-94. [HUANG Q B, PENG J B, WANG F Y, et al. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3):85-94. (in Chinese)]
- [5] 江思义,吴福,王启耀,等.岩溶地区地下空间开发适宜性评价——以桂林市规划中心城区为例[J].桂林理工大学学报,2019,39(2):402-409. [JIANG S Y, WU F, WANG Q Y, et al. Suitability evaluation of underground space development in karst area: an example from Guilin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(2):402-409. (in Chinese)]
- [6] 范士凯.武汉(湖北)地区岩溶地面塌陷资源环境与工程[J].2006,20(增刊1):608-616. [FAN S K. A discussion on karst collapse in Wuhan(Hubei)[J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(Sup1):608-616. (in Chinese)]
- [7] 徐贵来.武汉市覆盖层岩溶地面塌陷形成机理与危险性评价[D].武汉:中国地质大学(武汉),2016. [XU G L. Mechanism and hazard assessment of covered karst sinkholes in Wuhan city, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese)]
- [8] 涂婧,魏瑞均,杨戈欣,等.湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(6):68-73. [TU J, WEI R Y, YANG G X, et al. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City of Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6):68-73. (in Chinese)]
- [9] 罗小杰.武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J].中国岩溶,2013,32(4):419-432. [LUO X J. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4):419-432. (in Chinese)]

- [10] ZAJC M, POGACNIKŽ, GOSAR A. Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for exploitation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67:78–87.
- [11] LAMBERT D W, ADAMS G L, FODOR B, et al. Use of electrical resistivity surveying to evaluate collapse potential related to road construction over a cave[J]. Carbonates and Evaporites, 2013, 28 (1/2): 215–219.
- [12] DOS SANTOS ESM, SILVA RWS, SAMPAIO EES. Analysis of the risk of karst collapse in Lapao, Bahia, Brazil[J]. Exploration Geophysics, 2013 (3):198–212.
- [13] 伍小刚, 李天斌, 张中, 等. 传统瞬变电磁法的改进及其在隧道超前地质预报中的应用[J/OL]. 水文地质工程地质. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003025>. [WU X G, LI T B, ZHANG Z, et al. Improvement of traditional transient electromagnetic method and its application in advanced geological forecast of tunnel [J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003025>. (in Chinese)]
- [14] 田志飞, 贾杰南, 赵毅博. 隧道岩溶区浅层地震及地质雷达综合预报应用研究[J]. 水利科技与经济, 2018, 24 (5):32–38. [TIAN Z F, JIA J N, ZHAO Y B. Application of shallow earthquake and geological radar comprehensive prediction of tunnel karst area [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(5):32–38. (in Chinese)]
- [15] 陈玉玲, 韩凯, 陈贻祥, 等. 可控源音频大地电磁法再岩溶塌陷勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30 (6):2616–2622. [CHEN Y L, HAN K, CHEN Y X, et al. The application of CSAMT in karst collapse investigation [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (6): 2616–2622. (in Chinese)]
- [16] 李天祺, 彭涛, 郭印. 井间地震层析成像技术在岩溶勘察中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36 (6): 127–130. [LI T Q, PENG T, GUO Y. Application of cross-hole seismic computerized tomography technology to karst caves survey [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (6): 127–130. (in Chinese)]
- [17] 李耐宾, 裴世建. 微动技术在大连地铁岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16 (5):580–585. [LI N B, PEI S J. The application of microtremor technology to karst survey of the Dalian subway [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16 (5):580–585. (in Chinese)]
- [18] 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 等. 综合物探法在柳州泗角村岩溶塌陷区调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44 (5):143–149. [ZHENG Z J, AO W L, ZENG J, et al. Application of integrated geophysical methods to karst collapse investigation in the Sijiao village near Liuzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44 (5):143–149. (in Chinese)]
- [19] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47 (1):153–160. [FANG H, LI Q L, LEI X D, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered karst collapse in plain areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47 (1):153–160. (in Chinese)]
- [20] 屈若枫. 武汉地铁穿越区岩溶地面塌陷过程及其对隧道影响特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017. [QU R F. Research on the evolutive process of karst collapse and the impact mechanism of the karst on subway tunnel in Wuhan subway crossing area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese)]
- [21] 贺彬, 钟世华, 罗其奇, 等. 武汉地铁6号线岩溶发育特征及治理方案比选[J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (30):336–342. [HE B, ZHONG S H, LUO Q Q, et al. Characteristics of karst development and karst treatments of Wuhan metro line 6 [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (30): 336–342. (in Chinese)]
- [22] 徐小连. 综合物探技术在武汉市江夏区大桥新区岩溶探测中的应用研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31 (6): 80–85. [XU X L. Study on application of integrated geophysical prospecting for karst in Daqiao new area, Jiangxia economic development zone, Wuhan City [J]. Coal Geology of China, 2019, 31 (6):80–85. (in Chinese)]
- [23] 田望学, 毛新武, 何仁亮, 等. 武汉地区1:5万区调第四系研究进展[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27 (4): 286–291. [TIAN W X, MAO X W, HE R L, et al. Progresses in Quaternary system of Wuhan

- area in 1:50 000 regional geological survey [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2011, 27(4): 286–291. (in Chinese)]
- [24] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126–130. [ZHANG L F, ZENG X S, YAO Y S, et al. Review on karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126–130. (in Chinese)]
- [25] 邱向荣. 岩溶塌陷稳定性的灰色模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 58–61. [QIU X R. Grey fuzzy synthetic assessment for stability of karst collapse [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(4): 58–61. (in Chinese)]
- [26] 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. [YE T L. The exploration technique for microtremor array and its application [J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(1): 47–52. (in Chinese)]
- [27] 胡让全, 黄健民. 综合物探方法在广州市金沙洲岩溶地面塌陷、地面沉降地质灾害调查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 610–615. [HU R Q, HUANG J M. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of karst ground collapse and ground subsidence in Jinshazhou area, Guangzhou City [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 610–615. (in Chinese)]
- [28] 候超文. 综合物探技术在地下岩溶探测中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [HOU C W. Application research of integrated geophysical exploration technology in underground karst exploration [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese)]
- [29] 杨建明, 王洪昌, 沙椿. 基于等值反磁通瞬变电磁法的岩溶探测分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 846–850. [YANG J M, WANG H C, SHA C. An analysis of karst exploration based on opposing coils transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 846–850. (in Chinese)]
- [30] 赵杨杉, 王洁, 张威. 地质雷达方法在武汉岩溶探测中的应用分析[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(增刊1): 108–112. [ZHAO Y S, WANG J, ZHANG W. Applied analysis of ground penetrating radar in Wuhan karst prospecting[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(Sup1): 108–112. (in Chinese)]
- [31] 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2906–2922. [LIU Q H, LU L Y, WANG K M. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near-surface structure [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2906–2922. (in Chinese)]