

张银松,曹聪,康世海,等.重庆市中梁山地区隐伏塌陷特征及物探勘测的思路[J].中国岩溶,2020,39(6):918-927.  
DOI:10.11932/karst20200611

## 重庆市中梁山地区隐伏塌陷特征及物探勘测的思路

张银松<sup>1,2</sup>,曹聪<sup>1,2</sup>,康世海<sup>1,2</sup>,刘家富<sup>1,2</sup>

(1. 重庆市地下水资源利用与环境保护实验室,重庆 401147; 2. 重庆市地质矿产开发局南江水文地质工程地质队,重庆 401147)

**摘要:**为查明隐伏塌陷区域,分析重庆市中梁山地区岩溶塌陷的特征,发现塌陷主要发生在以岩溶裂隙发育为主的松散粉质黏土区域;地震映像法能方便、快速地查清土层的松散状态,而高密度电阻率法通过正演模拟发现只能探测出2~3倍电极距的异常范围,但能反映出岩溶裂隙发育的漏斗形态,即只要能找出岩溶裂隙的大致位置和浅表松散土层的范围就能圈定隐伏塌陷的区域。对中梁山地区某居民点进行野外勘测,综合以上两种方法圈定隐伏塌陷区域,其推断结果与钻探资料十分吻合,说明这种隐伏岩溶探测思路是可行的。

**关键词:**岩溶;隐伏塌陷;高密度电法;地震映像法

**中图分类号:**P642.25;P631 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2020)06-0918-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



### 0 引言

重庆市中梁山是重庆“四山”之一,其地质环境脆弱,岩溶发育强烈,水文地质条件复杂。近年来,受铁路、公路和轨道等各类隧道横穿中梁山的影响,致使大量地面塌陷发生。其中,以长江—嘉陵江之间的中梁山地区最具代表性,在这段南北长约53 km的山脉上,分布有已建隧道16条,在建隧道3条,规划隧道10条,现有隧道密度达0.358条·km<sup>-1</sup>,建设密度和强度世界罕见,所带来的地质环境破坏亦十分强烈<sup>[1]</sup>。截止2018年12月,地区因隧道修建诱发的地面塌陷超过300处,已严重影响人民生命和财产安全,查明隐伏塌陷区地下空间分布位置迫在眉睫。

国内学者对岩溶塌陷问题进行了较多分析研究,有从它形成的机理出发进行模拟试验的,有从力学性质和空间结构的角度分析岩溶塌陷的破坏形式

的<sup>[2-8]</sup>,还有采用物探或监测的方法找出隐伏塌陷区的<sup>[5]</sup>,其中用物探手段来寻找隐伏岩溶是现阶段最常用的方法,并且多数是多种方法联合勘测的模式<sup>[9-16]</sup>,在消除多解性的同时,可使资料解释更合理。通过多年地质调查分析,重庆市中梁山地区的塌陷多数是由浅表岩溶管道引起的,想在人口密集的城乡地区,查明地下岩溶管道的地下空间分布十分困难,国内外也鲜有合适的方法和仪器设备,但塌陷集中发生在土层,通过分析隐伏塌陷区的土层特点,勾勒出塌陷的基本模型,然后再根据其特点来规划合理的物探方法,最后可找到隐伏的塌陷位置。

高密度电法能准确探测出覆盖层的厚度,地震映像能对土层的松散程度进行划分<sup>[17]</sup>,为提高其勘探准确性,本文结合两种物探方法对岩溶塌陷区覆盖层的厚度及松散程度进行探测,以期重庆市中梁山地区地质灾害防治工作提供更多参考依据。

资助项目:重庆市政府计划项目[ZC-2018002(17C2113)];重庆山地城市地质地理三维虚拟华宁构建、展示与应用示范(KJ-2019047);重庆岩溶山区地面塌陷隐患识别技术研究与应用(cstc2019jcsx-msxmX0303)

第一作者简介:张银松(1985—),男,高级工程师,主要从事工程物探及水文地质勘探工作。E-mail:443835567@qq.com。

收稿日期:2019-09-30

## 1 研究区塌陷特征

### 1.1 地质概况

中梁山地区属低山地貌区,由观音峡背斜构成山地。山体两侧斜坡呈陡坡状,坡角在 $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间,山体中部为相对较为平缓的岩溶槽谷地貌,地形特征为典型的“一山三岭夹二槽”和“一山一槽二岭”,山体呈南北走向,整个区域地势北高南低,两边高中间低。地区岩溶槽谷宽窄不一,北段窄,南段宽;南、北段槽谷形态分明,宽 $100 \sim 500 \text{ m}$ ;槽谷中段宽缓,东、西槽谷形态不明显;高程在 $460 \sim 550 \text{ m}$ 之间,多形成洼地与低缓的峰丛残丘等地貌形态,条带状山丘主要分布在研究区中部,歌乐山镇至山洞村带,残丘与槽地的相对高差为 $30 \sim 80 \text{ m}$ ,以自然斜坡相接,坡角一般在 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间,局部形成陡坡或陡崖,总体地形北高南低。

区内出露的地层主要从背斜核部至两翼对称分布的是二叠系上统长兴组( $P_2c$ )、三叠系下统飞仙关组( $T_1f$ )、嘉陵江组( $T_1j$ ),中统雷口坡组( $T_2l$ ),上统须家河组( $T_3xj$ )。在斜坡的凹部及槽谷区等较平缓地带分布有第四系残坡积层( $Q_4^{pl}$ ),在村镇区分布有全新统人工堆积层( $Q_4^{ml}$ )<sup>[1-2]</sup>。

### 1.2 塌陷的形成特征

塌陷形成的影响因素很多,从形成塌陷的形态模型出发,主要因素有地质构造、地形地貌、第四系覆盖层分布、地下水等<sup>[1-8]</sup>。

#### (1) 地质构造对塌陷的影响

中梁山地区地面塌陷主要受地质构造控制,表现为沿构造线方向发育,其主要原因是构造作用下,裂隙发育,岩体破碎,这既有利于形成地下水补给、径流和排泄的通道,使水动力条件活跃,也有利于塌陷充填物的储存和运移,客观上形成了地面塌陷的持续性。

#### (2) 地形地貌对塌陷的影响

区域内地貌形态的不同,直接表现出塌陷的发育程度不同,塌陷最多分布在岩溶洼地地段,次之为岩溶残丘,而在峰丛地段,基本无塌陷分布。这主要是因为,在洼地地段,地表岩溶最为强烈,岩溶个体形态多以洼地、天窗、漏斗、落水洞、竖井、暗河管道等形式存在,便于地表水的汇集和与地下水的交换作用。由于其多为竖向管道,在进行地下水补给时,形成较大的水力坡度,冲刷和侵蚀作用明显,往往在极

端气候或水环境突变时,引发地面塌陷。

#### (3) 地下水对塌陷的影响

地下水对塌陷的影响主要表现在埋藏条件和动态变化上。埋藏条件对塌陷的影响主要表现在埋深和含水岩组特征上。中梁山地区地下水埋深较大的地段(如研究区南北两侧近长江、嘉陵江排泄地段),不易发生地面塌陷,而在地下水埋深较浅地段,易于发生塌陷。而地下水含水岩组是富水—极富水的洞缝型含水岩组,还是中—弱富水孔隙裂隙型含水岩组,这直接影响地下水的活跃性;而地下水活跃地段,往往塌陷强烈发育。

#### (4) 第四系覆盖层对塌陷的影响

区域内第四系土层主要以黏性土为主,取样测试塌陷坑内和无塌陷区土体发现,塌陷区土体以粉质黏土为主,而无塌陷区土体以次生红黏土或红黏土为主。而红黏土主要由碳酸盐岩风化形成,在经过搬运改造后,成为次生红黏土,而塌陷区大量土体为粉质黏土(表1),其原因主要是塌陷区往往存在着大量落水洞、竖井、漏斗等竖向岩溶管道,而管道的存在,致使该地区形成了土体受地表水向下搬运的条件,经长期作用,形成了冲洪积性质的粉质黏土,而在部分地段存在着卵石及砂层,也是这种作用的重要表现。

根据土体性质,可判断塌陷主要发生在粉质黏土地段,而在次生红黏土或红黏土地段,塌陷发生较少。出现地面塌陷的区域,均为充填在岩溶管道空间内的第四系松散土体下陷,在基岩出露地段,无塌陷发生。因此,地区塌陷发生的充分条件是存在着第四系松散土层,土层的来源既包括天然条件下沉积的黏性土,也包括后期人类工程活动形成的填筑土层。

综上所述,浅层的岩溶塌陷主要以竖向管道的岩溶裂隙发育为主,研究区地面塌陷发生在上部覆盖有松散土层、下部有岩溶洞隙空间,且水动力条件活跃地段,这也是地区塌陷形成发生的基本条件<sup>[1-2]</sup>。

## 2 物探设计

浅层塌陷的形成,主要以岩溶裂隙发育为主,往往揭露的形式是漏斗状(图1)。探寻浅层塌陷区域,主要目的就是找到岩溶裂隙发育的位置和浅表松散土层的范围。

表1 地面塌陷与土体性质分布情况  
Table 1 Distribution of ground collapses and soil properties

序号	地段	取样组数/组	液限范围	土体性质	塌陷频次/处
1	茅山峡村大龙井塌陷群	16	25.3 ~ 30.3	粉质黏土	48
2	仙米山塌陷区	6	23.8 ~ 31.1	粉质黏土	3
3	草莓园塌陷区	14	24.3 ~ 30.5	粉质黏土	3
4	大烂池塌陷区	16	27.8 ~ 29.6	粉质黏土	8
5	中梁镇庆丰山村	11	28.9 ~ 35.1	粉质黏土	6
6	中梁镇龙泉村	15	25.4 ~ 29.6	粉质黏土	4
7	余家湾塌陷区	8	22.9 ~ 32.1	粉质黏土	67
8	新开寺塌陷区	8	25.8 ~ 30.2	粉质黏土	11
9	中梁镇新华村五香庙	11	47.5 ~ 51.8	次生红黏土红黏土	0
10	九龙坡区油麻天池	5	32.6 ~ 46.3	粉质黏土次生红黏土	0
11	大渡口区拱桥村	6	24.1 ~ 29.6	粉质黏土	7
	总计	116	—	—	—

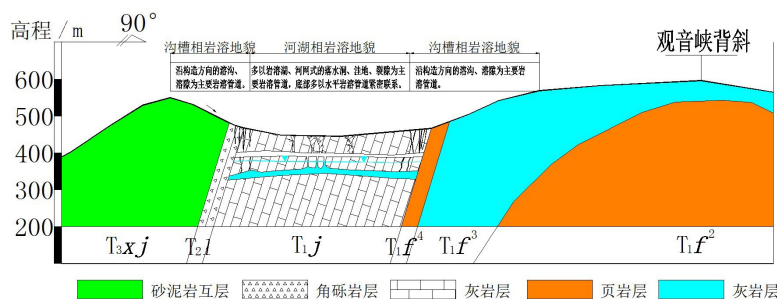


图1 中梁山岩溶系统剖面图

Fig. 1 Geological profile of karst system in Zhongliangshan area

## 2.1 岩溶裂隙位置圈定

探测岩溶最常用的物探方法是高密度电法,根据岩溶塌陷模型<sup>[18-19]</sup>,设计出一个正演模型,背景电阻率设定值为  $60 \Omega \cdot m$ ,岩层电阻率设定值为  $500 \Omega \cdot m$ ,每一个网格宽度表示  $1 m$ ,设计漏斗开口  $10 m$ ,按每层  $2 m$  递减,最后一层为  $2 m$ (图2)。

对模型进行反演试验,设计电极间距为  $2 m$ ,由反演成图(图3,图4)可见,虽然温纳装置和偶极装置对异常都有一定反应,但两种装置均不能体现出底部  $2 m$  的异常,其中温纳装置能反演出的底部宽度为  $6 m$ ,偶极装置能反演出的底部宽度为  $4 m$ ,即分别能分辨出3倍电极距和2倍电极距的异常范围。而岩溶裂隙宽度一般不超过  $1 m$ ,有些甚至不超过  $10 cm$ ,因而使用高密度电法,甚至其他的物探方法想精确勘测出岩溶裂隙宽度十分困难。如尽量减小电极间距,也很难准确反映出岩溶裂隙位置,但可见两种装置对岩土界面的划分是比较清晰的,无论是否存在岩溶裂隙,都能反应出形如漏斗状的趋势,这样能

进一步缩小探寻隐伏塌陷区域的范围<sup>[10,13]</sup>。

## 2.2 松散土层探测

高密度电法能划清岩土体界面,但对土层的松散程度是无法进行分辨的。由于浅表松散土层的纵波波速小于致密土层的纵波波速,最常用的就是浅层地震方法,但由于在山区地形起伏较大,地震反射波法和瑞雷波法很难实施,而地震映像法不但对探测浅部介质中纵、横向不均匀体有良好反应,且工作效率高,采用小偏移距非常适用于复杂的工作环境,可根据工地条件多试用几种偏移距进行综合比较<sup>[16]</sup>。寻找隐伏岩溶区域,可拟先开展高密度电法,后进行地震映像法勘测。

## 3 实例分析

### 3.1 试验工区情况

重庆市中梁镇茅山峡村仙米山一村民家,2018

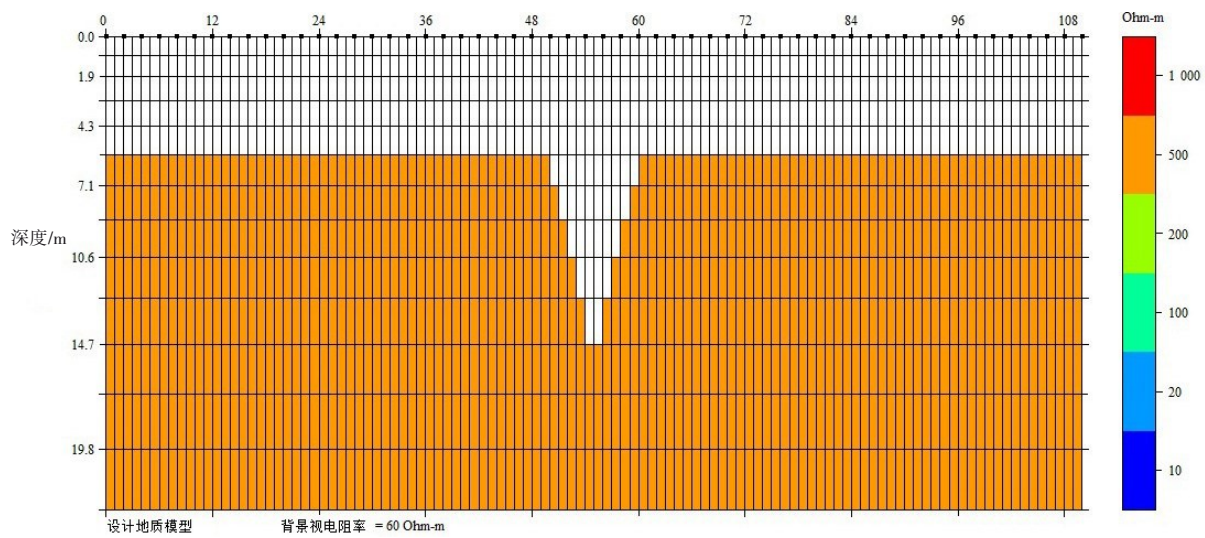


图 2 高密度电法正演模型

Fig. 2 Forward modeling of high density electrical method

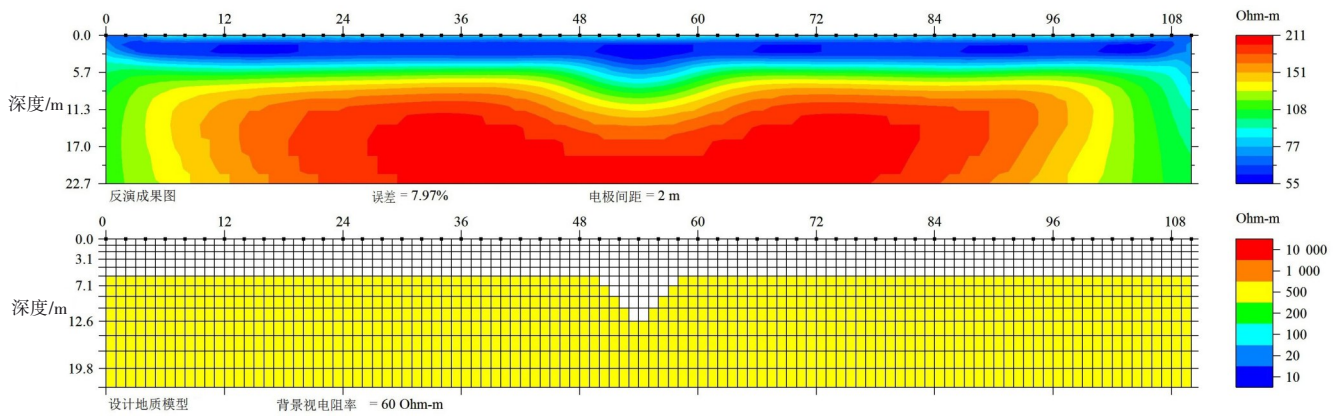


图 3 高密度电法模型温纳装置反演成果图

Fig. 3 Inversion section of Wenner device of high density electrical method

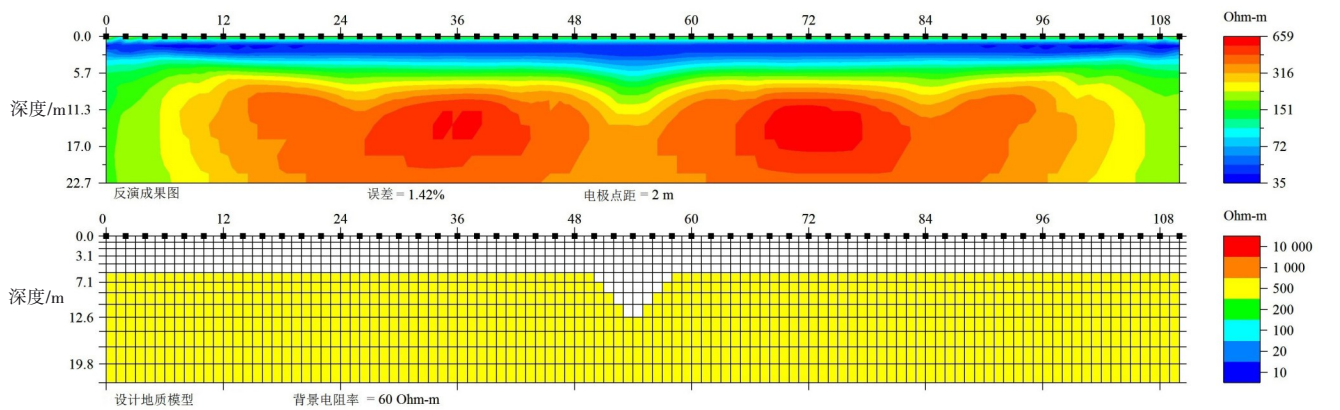


图 4 高密度电法模型偶极装置反演成果图

Fig. 4 Inversion section of Dipole device of high density electrical method

年4月TX01号塌陷(图5),距离房屋约6 m,对耕地和乡村便道造成了破坏,由于塌陷距离居民房屋很近,且多次发生,存在较大的安全隐患。

工作区位于中梁山东侧岩溶槽谷边缘,为槽谷和缓坡的交接部位,东侧缓坡坡向295°,坡角5°~15°,分布高程为503~526 m,最高点位于东侧斜坡之



图5 房屋附近塌陷的分布图

Fig. 5 Distribution of collapses near the house

上, 高程为 526 m, 最低点位于东侧槽谷内, 高程为 503 m。

区内出露的地层为嘉陵江组三段( $T_j^3$ )、四段( $T_j^4$ ), 上部覆盖第四系残人工填土( $Q_4^m$ )及坡积层( $Q_4^{el+dl}$ ), 各岩土层特征如下:

#### (1) 人工填土( $Q_4^m$ ):

素填土: 褐黄色、深灰色, 稍湿, 主要物质组成为粉质黏土、灰岩碎块石等; 碎块石呈棱角状, 块径为 1.0~20.0 cm, 最大块径在 50 cm 左右, 以粉质黏土为主, 结构较密实, 土石比为 3:7~7:3, 碎块含量差异较大, 局部含杂填土; 揭露厚度为 0.37~3.43 m, 堆填时间大于 5 年, 主要分布在房屋和道路位置。

#### (2) 残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ ):

粉质黏土: 褐黄色, 可塑—硬塑状, 干强度、韧性中等, 无摇振反应, 钻探揭露厚度为 2.30~10.72 m。分布广泛。

#### (3) 嘉陵江组三段( $T_j^3$ ):

灰色、黄灰色中厚层状微晶灰岩, 局部夹泥质白云岩、生物碎屑灰岩和泥质白云质泥灰岩, 分布广泛。

通过调查, 初步推断工作区内岩溶发育主要受岩层走向和构造裂隙控制, 整体岩溶较发育, 上部主要为竖向岩溶, 与下部水平岩溶连通性较好, 在区域内极易发育浅部溶洞或土洞, 急需勘测出现塌陷位置的发育情况和隐伏塌陷区域, 勘测深度在 20 m 范围内。

### 3.2 数据采集布置及参数

根据其塌陷分布情况, 共布置了 8 横 8 纵、16 条

测线(图 6), 测线长度为 110 m, 其中 8 条纵测线与岩层走向平行, 编号为  $Ws_1$ ~ $Ws_8$ , 另 8 条横测线与岩层走向垂直, 编号为  $Wh_1$ ~ $Wh_8$ , 每条测线间距 10 m; 方向为从上至下和从左至右, 分别开展高密度电法和地震映像法勘测。为达到较好的勘测效果高密度电法最后采用了 2 m 点距的布设模式, 参照了温纳和偶极两种装置系数。由于在山区, 地震映像法偏移距不宜过大, 采用小偏移距不但方便施工, 而且针对浅层的松散土层效果较好。在采集时, 点距和道间距都是 2 m, 偏移距采用了 2 m、4 m 和 6 m 进行工作。

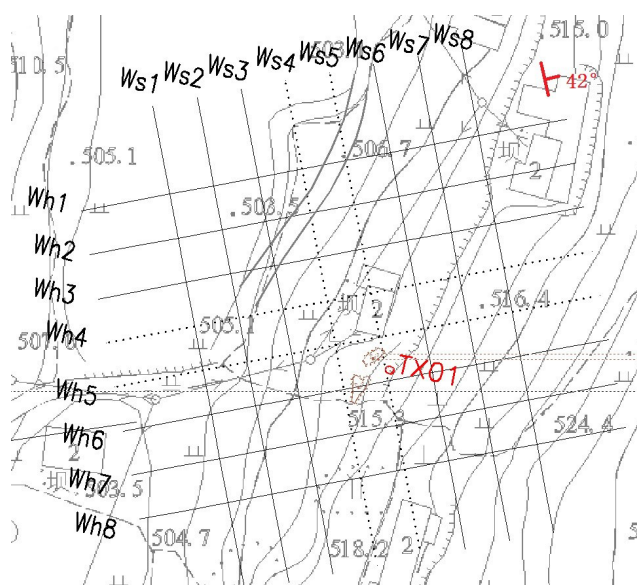


图6 物探测线布置图

Fig. 6 Layout of geophysical survey lines

### 3.3 资料解释

预计布置的 16 条测线, 最后完成了 12 条, 其中横线和纵线的 4 和 5 号线由于穿越房屋未能进行勘测。根据采集数据情况, 分析了横线的  $Wh_3$  和  $Wh_6$  线及纵线的  $Ws_6$  线。

由图 7 和图 8 可知,  $Wh_3$  测线在里程 40~46 m 处出现明显漏斗形状, 结合地质资料分析, 该处为原塌陷区域, 并且使用块石土回填过, 现场采集数据时, 未发现新的塌陷迹象; 结合地震映像剖面, 在该里程段 2 m、4 m、6 m 偏移距剖面反射波同相轴连续, 振幅未出现差异, 综合推断该处原塌陷区域没有复塌的可能; 在里程 52~68 m 处, 两种高密度电法都出现近似漏斗状, 偶极装置反演图形态较显著, 结合 3 条不同偏移距地震映像剖面(图 9), 在该里程段反射波同相轴错段, 振幅明显增大, 波形衰减缓慢, 综合推断该处土层较松散, 为隐伏塌陷区域。

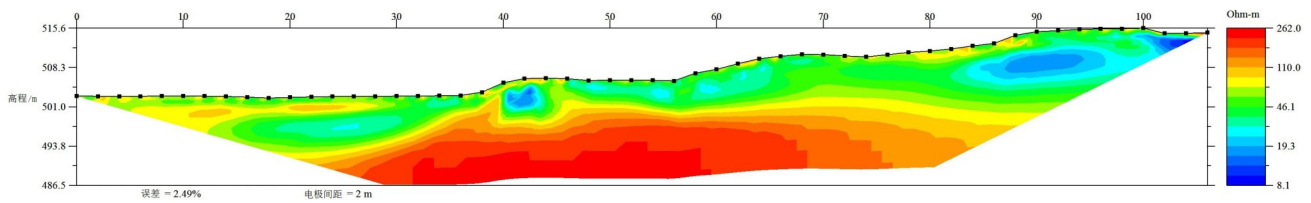


图7 Wh3线高密度电法温纳装置反演成果图

Fig. 7 Inversion section of Wenner device of high density electrical method along line Wh3

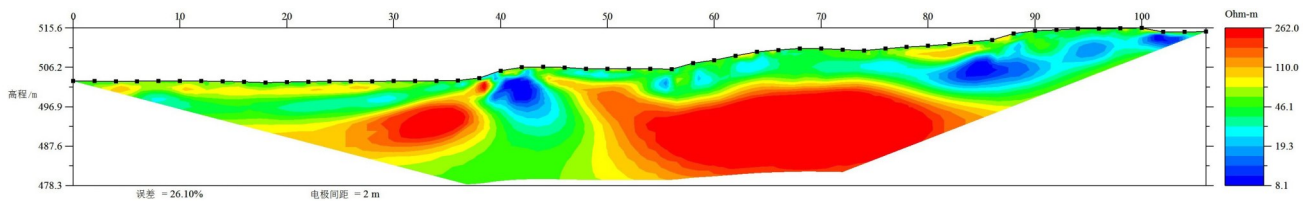


图8 Wh3线高密度电法偶极装置反演成果图

Fig. 8 Inversion section of Dipole device of high density electrical method along line Wh3

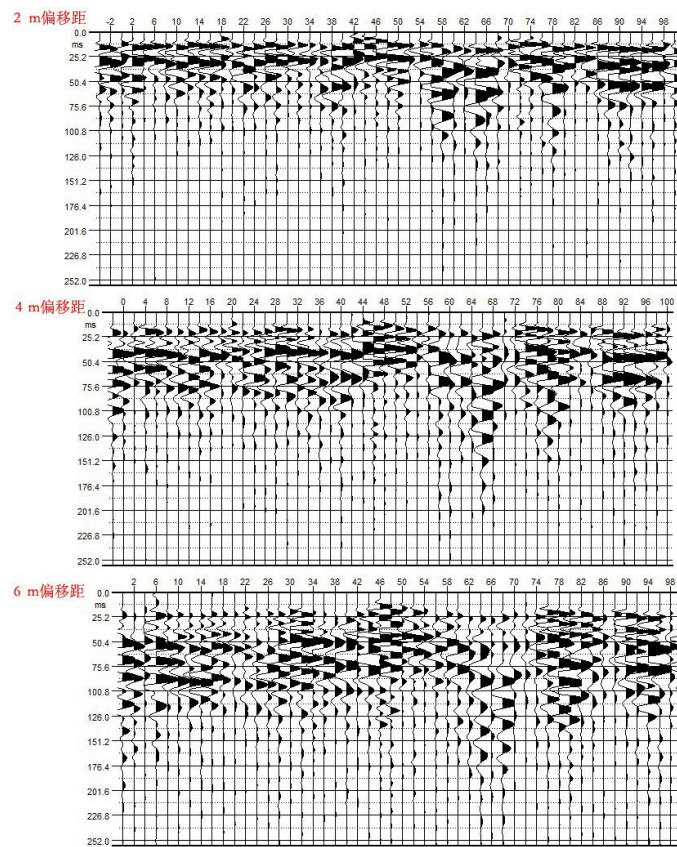


图9 Wh3线地震映像法解释图

Fig. 9 Interpretation section of seismic imaging method along line Wh3

Wh6测线前 20 m 由于是厂房和公路,电极无法接地,不能开展勘测工作,故从里程 22 m 处开始,在里程 62 m 位置正通过塌陷区。由图 10 和图 11 可知,两种高密度电法剖面清晰反映出了岩土界面,在里程 52 ~ 82 m 间,明显出现漏斗状,里程 62 ~ 63 m 为岩层起伏最低点,推测为岩溶管道位置,结合 3 条不同

偏移距地震映像剖面(图 12),在里程 62 ~ 72 m 处反射波同相轴错段,振幅明显增大,波形衰减缓慢,综合推断该处土层较松散,里程 62 ~ 72 m 为隐伏塌陷区域;在高密度剖面图中,里程 72 ~ 82 m 同样有一个近似漏斗状的区域,结合地震映像剖面,在该里程段反射波同相轴连续,振幅未出现差异,综合推断该处

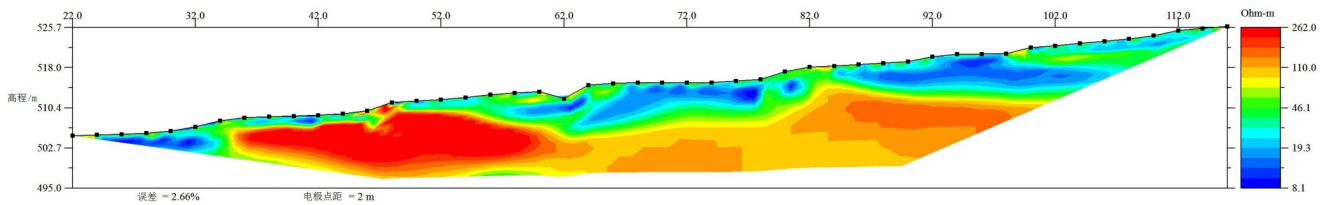


图 10 Wh6线高密度电法温纳装置反演成果图

Fig. 10 Inversion section of Wenner device of high density electrical method along line Wh6

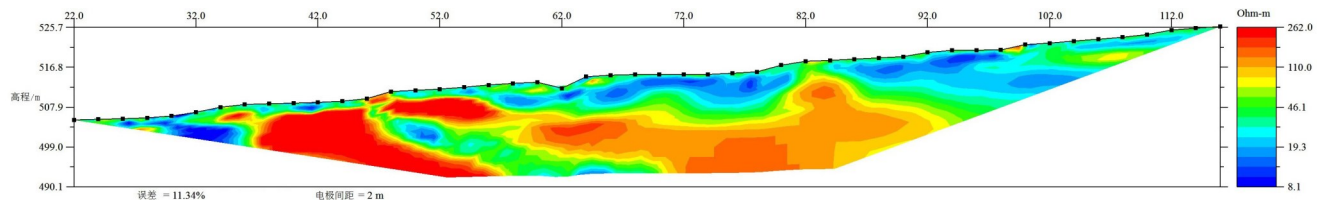


图 11 Wh6线高密度电法偶极装置反演成果图

Fig. 11 Inversion section of Dipole device of high density electrical method along line Wh6

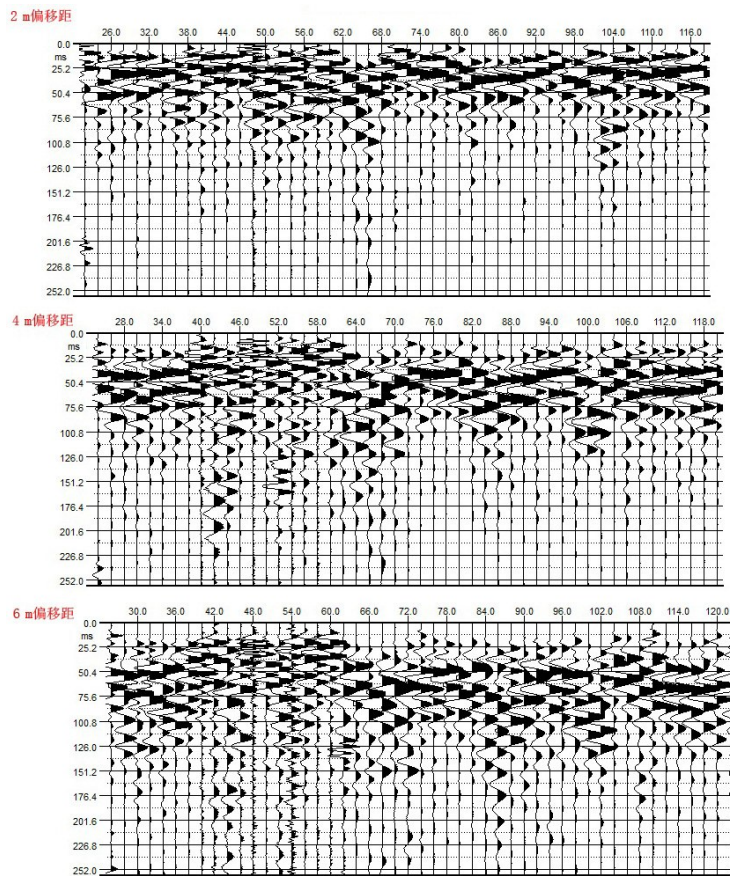


图 12 Wh6线地震映像法解释图

Fig. 12 Interpretation section of seismic imaging method along line Wh6

为非隐伏塌陷区域;在3条地震映像剖面中,里程0~50 m处,波形杂乱,反射波同相轴错乱,结合现场踏勘分析,该处基岩出露,地势较起伏,综合分析该段应为假异常;在4 m和6 m偏移距地震映像剖面中,里程84~88 m和98~102 m处,反射波同相轴较连续,

振幅明显增大,波形衰减缓慢,但在高密度电法剖面反应不明显,综合推测该段土层较松散,为非隐伏塌陷区域。

Ws6测线在里程40 m和70 m处分别与Wh3线的里程70 m和Wh6线的里程70 m相交,结合两处相交

的情况,数据资料一致性较好。由高密度电法剖面图(图 13,图 14)可见,温纳装置系数的剖面岩层较平缓,未揭露隐伏塌陷区,偶极装置系数的剖面在里程 54~66 m 出现漏斗状,结合 3 条地震映像剖面图(图 15),在里程 48~64 m 处,虽反射波同相轴连续,但振幅明显增大,波形衰减缓慢,综合推测里程 48~64 m 处,土层较松散,为隐伏塌陷区域;在 3 条地震映像

剖面中,里程 0~40 m 处,波形杂乱,反射波同相轴错乱,结合现场踏勘分析,该处基岩出露,地势较起伏,综合分析该段应为假异常;在 4 m 和 6 m 偏移距地震映像剖面中,里程 80~102 m,反射波同相轴较连续,振幅明显增大,波形衰减缓慢,但在高密度电法剖面反映不明显,综合钻探资料分析,推测该段土层较松散,为非隐伏塌陷区域。

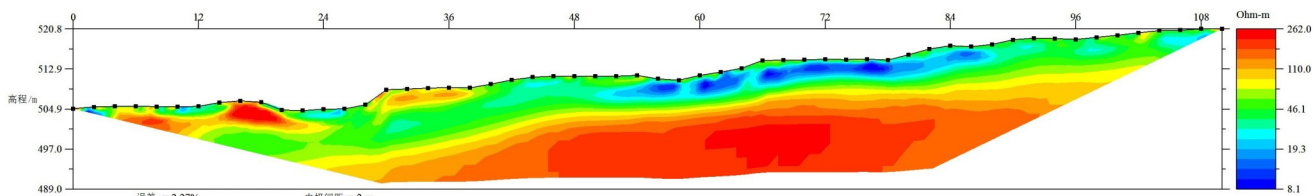


图 13 Ws6线高密度电法温纳装置反演成果图

Fig. 13 Inversion section of Wenner device of high density electrical method along line Ws6

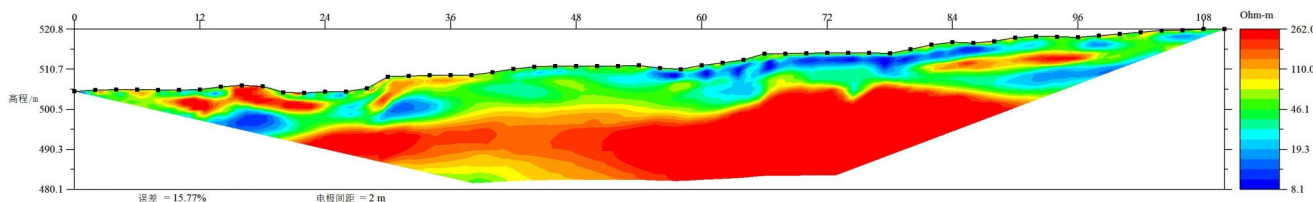


图 14 Ws6线高密度电法偶极装置反演成果图

Fig. 14 Inversion section of Dipole device of high density electrical method along line Ws6

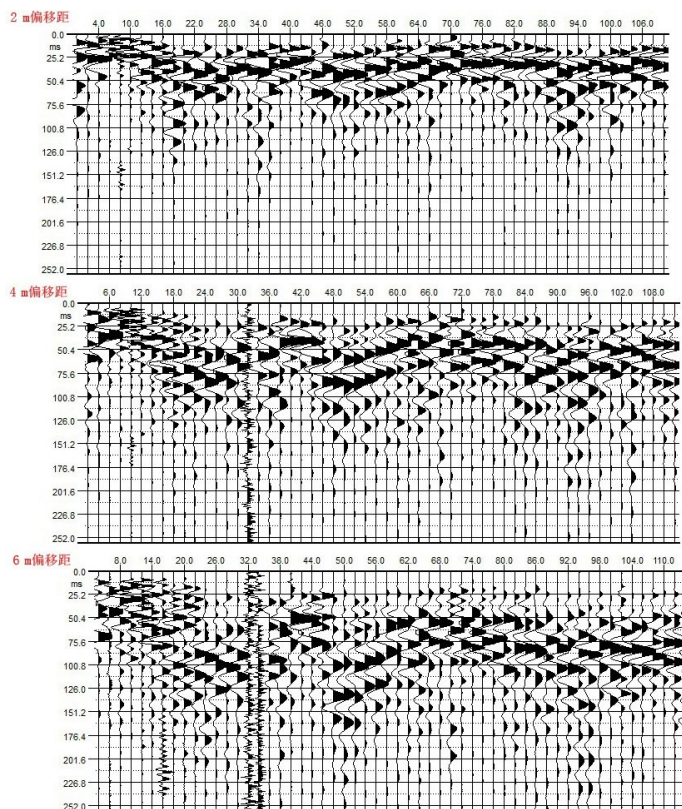


图 15 Ws6线地震映像法解释图

Fig. 15 Interpretation section of seismic imaging method along line Ws6



### 3.4 资料验证

为验证物探资料,查明房屋周边的土层厚度及其隐伏塌陷区域,此次在房屋周边布置了10个钻孔,钻孔具体情况见图16,钻孔资料详见表2。

根据房屋周边的钻探和物探资料显示,虽然钻孔未揭露塌陷区域及空洞,但ZK1、ZK4、ZK5、ZK8、

ZK9号孔局部土体结构较松散,这与物探的解译较为一致。

## 4 结论及建议

通过分析塌陷的特征,调整思路,为了解重庆市中梁山地区塌陷的基本轮廓,利用高密度电法先勘测土岩界面并进行划分,再针对划分出的异常区域利用小极距地震映像对土层的松散层度进行勾勒,最终绘制出隐伏塌陷区域,这不但能预测地面塌陷,甚至在预警工作中也能发挥重要作用。

根据试验结果,利用两种方法的联合勘测是可行的,但也存在可优化之处:

(1)高密度电法的工作参数很多,可对其余的装置系数进行模拟试验,并针对不同地质模型采用多种方法的模拟,进一步提高数据的准确性;

(2)地震映像法对浅部覆盖层的结构反映较好,还可根据不同的偏移距、点距及采样时长等参数,进行反复试验,能在兼顾浅部有用信息时采集更多的深部数据,消除多解性,提高资料准确性和工作效率。

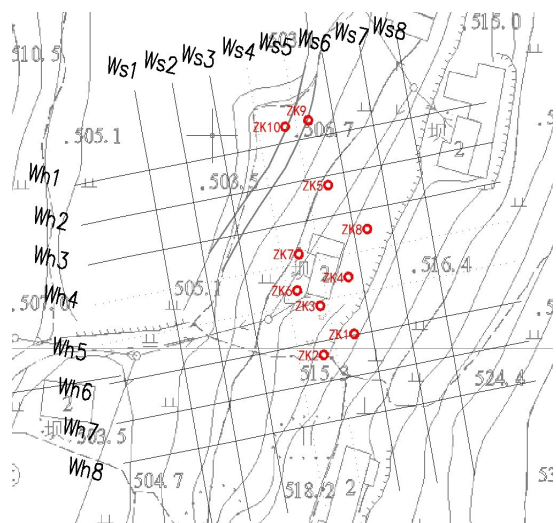


图16 钻孔分布图

Fig. 16 Distribution of drilling holes

表2 钻探资料情况

Table 2 Data of drilling holes

钻孔编号	X坐标	Y坐标	孔口高程/m	钻孔深度/m	土层厚度/m	地质描述	特殊现象
ZK1	78003.58	49610.83	515.1	9.72	9.72	0~0.83m为耕植土;0.83~9.72m为黏土; 9.72m以下为灰岩	3.02~6.67m土体结构松散
ZK2	77998.43	49603.03	514.6	4.18	3.86	0~0.39m为耕植土;0.78~3.86m为黏土; 3.86m以下为灰岩	
ZK3	78010.54	49601.99	512.0	3.95	3.75	0~0.48m为素填土;0.48~3.75m为黏土; 3.75m以下为灰岩	
ZK4	78017.61	49609.32	512.1	7.30	7.20	0~0.37m为素填土;0.37~7.20m为黏土; 7.20m以下为灰岩	3.00~7.20m土体结构松散
ZK5	78040.48	49604.00	510.2	15.03	15.00	0~0.92m为耕植土;0.92~15.00m为黏土; 15.00m以下为灰岩	9.31~15.00m土体结构松散
ZK6	78014.35	49595.90	512.0	2.52	2.30	0~2.30m为素填土;2.30m以下为灰岩	
ZK7	78023.34	49596.31	511.9	10.14	9.74	0~3.10m为素填土;3.10~9.74m为黏土; 9.74m以下为灰岩	
ZK8	78029.45	49614.23	512.2	7.87	7.36	0~2.13m为素填土;2.13~7.36m为黏土; 7.36m以下为灰岩	3.40~7.36m土体结构松散
ZK9	78056.41	49598.80	506.6	10.12	9.50	0~2.60m为素填土;2.60~9.50m为黏土; 9.50m以下为灰岩	8.13~9.50m土体结构松散
ZK10	78054.89	49592.84	506.7	10.95	10.72	0~3.43m为素填土;3.43~10.72m为黏土; 10.72m以下为灰岩	

## 参考文献

- [1] 张海坦,李庆华,邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 58-63.
- [2] 彭海游,任秀文,杨乐. 重庆市歌乐山—中梁山地面塌陷形成机理[C]. 全国青年地质大会, 2013.
- [3] 蒙彦,雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.
- [4] 雷明堂,蒋小珍. 岩溶塌陷预测评价系统及其应用:以唐山岩溶塌陷为例[J]. 中国岩溶, 1997, 16(2): 97-104.
- [5] 蒋小珍,雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 786-791.
- [6] 高宗军,马海会,王敏,等. 岩溶地面塌陷预测模型初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 66-71.
- [7] 黎志豪,许光泉,余世滔,等. 淮南舜耕山岩溶塌陷发育特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 418-426.
- [8] 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, 2002, 13(1): 18-22.
- [9] 张银松,张家刘,李斌. 综合物探电法在岩溶石山找水中的应用及其应用[J]. 工程勘察, 2014, 42(8): 89-92.
- [10] 吴亚楠. 高密度电阻率法在莱芜市泉河地区岩溶地质勘查中的应用[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 617-623.
- [11] 张伟,甘伏平,梁东辉,等. 多道瞬变面波法与微动法联合推断岩溶塌陷区覆盖层的结构和厚度分布[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 272-279.
- [12] 刘伟,甘伏平,周启友,等. 高密度电阻率成像法与微动谱比法探测岩溶区塌陷的地质背景:以广东省高要市蛟塘镇墘下村塌陷区为例[J]. 地质与勘探, 2019, 55(1): 115-126.
- [13] 郭栋栋,赵俐红,高宗军. 高密度电法在泰安羊娄—旧县岩溶塌陷探测中的应用[J]. 地下水, 2011, 33(2): 108-110.
- [14] 郑智杰,曾洁,甘伏平,等. 高密度电法在柳州太阳村镇岩溶塌陷区调查中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 130-138.
- [15] 张进国,夏训银,王洪生,等. 岩溶塌陷区综合物探方法的应用效果[J]. 勘察科学技术, 2011, 169(1): 56-58.
- [16] 高飞,张立军. 应用综合物探法勘查评价抚顺榆林局局部塌陷区[J]. 地质与资源, 2001, 10(2): 116-118.
- [17] 王治华,仇恒永,杨振涛,等. 地震映像法及其应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(6): 696-700.
- [18] 郑智杰,甘伏平,曾洁. 不同深度岩溶管道的高密度电阻率法反演特征[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 292-297.
- [19] 周文龙,吴荣新,肖玉林. 充水溶洞特征的高密度电阻率法反演分析研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 699-705.

## Characteristics of hidden karst collapse in the Zhongliangshan area of Chongqing and an approach of geophysical surveys

ZHANG Yinsong<sup>1,2</sup>, CAO Cong<sup>1,2</sup>, KANG Shihai<sup>1,2</sup>, LIU Jiafu<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Chongqing Groundwater Resources Utilization and Environmental Protection, Chongqing 401147, China; 2. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401147, China)

**Abstract** The Zhongliangshan area in Chongqing has a low mountain landform, composed of the Guanyinxia anticline. It is a high-level karst with steep topography and complex geological environments. In recent years, with increasing human engineering activities, karst ground collapses occur frequently, leading to serious geological hazard, posing threat to safety of people's life and property in this area. This work attempts to clarify the characteristics of these karst collapses. Through sampling and analyzing soil layers in the collapsed and non-collapsed areas, it is found that collapses mainly occur in loose silty clay areas with karst well developed, and suffosion is the main factor for collapse occurrence. Forward simulation on the geological model indicates that the high-density resistivity method can only detect anomalous range of 2-3 times the electrode distance, it is difficult to detect fine fractures, but it can reflect the approximate location of karst cracks, namely, it permits to delineate the funnel-shaped geological form. Then by using the seismic imaging method to divide the loose layer of surface soil, the hidden karst collapse area can be delineated. In the field survey to a residential district of the Zhongliangshan area, the high-density resistivity method is used to preliminarily screen hidden karst, and then the seismic imaging is conducted to find the area of shallow loose soil layer. In terms of such an integrated approach, the hidden collapse karst area is delineated. Finally, 10 boreholes are drilled to verify the survey results, among which 5 boreholes reveal the characteristics of the loose soil structure, in agreement with the results of geophysical surveys. It demonstrates that the approach of geophysical surveys aforementioned is feasible in detection of hidden karst collapses.

**Key words** karst, hidden collapse, high density electrical method, seismic imaging method

(编辑 黄晨晖)