

doi: 10.11720/wtyht.2022.1566

张健,冯旭亮,岳想平.综合物探方法在隐伏岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2022,46(6):1403-1410. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1566

Zhang J, Feng X L, Yue X P. Application of comprehensive geophysical prospecting method in detecting concealed karst collapses[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1403-1410. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1566

# 综合物探方法在隐伏岩溶探测中的应用

张健<sup>1</sup>, 冯旭亮<sup>2</sup>, 岳想平<sup>3</sup>

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院, 甘肃 天水 741020; 2. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 3. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 我国岩溶分布范围广泛, 岩溶区地质环境脆弱, 地质灾害频发, 严重威胁到人民群众的生命财产安全, 造成了巨大的经济损失。本文采用可控源音频大地电磁法(CSAMT)和微重力法, 通过二维拟断面反演、小波多尺度提取剩余重力异常, 较好地划分了岩溶区的岩土界面及强岩溶发育带, 圈定了溶洞的位置、埋深、规模及空间分布情况。通过钻孔验证, CSAMT 解释的岩土界面及强岩溶发育带与钻孔基本吻合, 微重力圈定的塌陷溶洞规模及埋深与工勘钻孔基本吻合, 表明 CSAMT 配合微重力法在探测隐伏岩溶塌陷时效果较为显著, 可为潜在的岩溶塌陷区及类似地质灾害防治预警提供科学探查方法。

**关键词:** 岩溶塌陷; CSAMT; 微重力

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)06-1403-08

## 0 引言

中国是岩溶大国, 岩溶分布面积超过 340 万 km<sup>2</sup>, 约占国土面积的 36%<sup>[1]</sup>。我国岩溶区不但面积大, 而且岩溶地质与岩溶地貌非常典型并具有代表性, 是在国际上具有地域优势的领域<sup>[2]</sup>。我国岩溶区内具有丰富的地质景观、地下水、油气和矿产资源, 但存在石漠化、岩溶塌陷、岩溶干旱、地下河污染和矿井突水等非常突出的环境地质问题, 因此, 岩溶研究在我国科学研究与技术应用领域占有重要而突出的地位<sup>[3]</sup>。

岩溶塌陷作为岩溶区最主要的地质环境问题之一, 广泛分布于世界各国<sup>[4]</sup>。据报道, 全球多国均有岩溶塌陷发育。中国岩溶塌陷分布最广, 类型最全, 主要分布于西南、东南片区, 涉及大致 23 个省(市、区), 岩溶塌陷坑总数超过 4.5 万个。

岩溶体与围岩常常有一种或多种明显的物性差

异, 构成了用物探方法勘察岩溶的物质基础<sup>[5]</sup>。目前, 岩溶勘察中常用的物探方法有电法、地震法、微重力法、射气法和地球物理测井等。电法主要分两类: 一类是电阻率法, 包括电剖面、电测深、高密度电法、三电位等; 另一类是电磁法, 包括 TEM、CSAMT、EH4、AMT、无线电透视法等。地震法主要是折射波法、反射波法、跨孔地震法、地面—钻孔地震法、地震剖面法(VSP)。本文选择 CSAMT 法和微重力法组合, 其优势在于 CSAMT 不会像电阻率法受到电极附近不均匀体的干扰, 而且具有效率高、成本低、分辨率高、抗干扰能力强等优势; 微重力法对低密度体反映灵敏、识别准确, 因岩溶的空腔填充物无论是空气、水还是沉积物, 相对围岩都是非常明显的低密度体。CSAMT 可圈定大范围的岩溶发育带, 微重力对岩溶发育带进一步解析, 可较为准确地圈定岩溶体的边界及埋深, 从而达到岩溶勘察的目的。

本次研究区为重庆市中梁山浩瀚园林位于歇马隧道以南约 1 km 处, 区内岩溶发育, 地质环境脆弱,

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-12-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190266)

第一作者: 张健(1987-), 男, 甘肃平川人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理方法技术研究及勘探工作。Email: 546864271@qq.com

通讯作者: 冯旭亮(1989-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事重、磁勘探方法理论与应用及构造地球物理解释研究工作。Email: fxlchd

@163.com

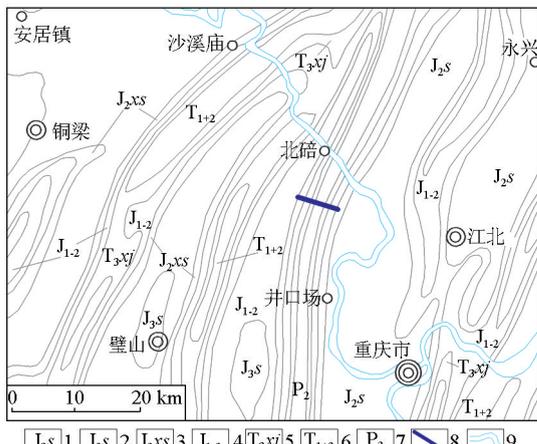
加上大型地下工程施工大量抽排地下水的影响,该区陆续发生严重的地面塌陷、地面沉降、地质灾害,楼房相继发生倾斜、变形和开裂,严重威胁人民群众的生命财产安全,造成了巨大的经济损失。据已有资料表明,轨道一号线隧道建设之后,于2010年10月20日在金刚村龙塘坎发生多处塌陷,随后双碑隧道于2012年2月进入岩溶槽谷施工,陆续发生近40余处地面塌陷,其中1处发生在渝生装饰板厂,生产厂家被迫停工。

本文以浩瀚园林内1处已塌陷区为重点研究区,综合采用CSAMT和微重力进行了方法技术优化组合,由已知到未知探测区内隐伏岩溶塌陷,通过对两种方法取得的成果综合分析,最终圈定岩溶塌陷区5处,经钻孔验证,圈定的岩溶塌陷区埋深、规模与实际情况基本吻合。

## 1 测区水文地质、地球物理特征

### 1.1 区域地质

研究区大地构造属于万县小区和泸州小区,区域地质如图1所示。新生界第四系出露不多,主要分布于长江、嘉陵江两岸,在背斜槽谷和山间谷地也有零星出露。中生界分布范围较广,主要为中下三叠统的陆相沉积地层。古生界仅出露了二叠系,在研究区北部白庙子和南部中梁山一带有断续零星分布,主要为一套海相地层。



1—侏罗系遂宁组;2—侏罗系上沙溪庙组;3—侏罗系下沙溪庙组;4—侏罗系珍珠冲组、自流井组、新田沟组;5—三叠系须家河组;6—三叠系中下统;7—二叠系上统龙潭组;8—CSAMT 测线 PM01 位置;9—河流  
 1—Jurassic Suining formation; 2—Jurassic upper Shaximiao formation; 3—Jurassic lower Shaximiao formation; 4—Jurassic Zhenzhuchong formation, Ziliujing formation, Xintianguou formation; 5—Triassic Xujiahe formation; 6—middle lower Triassic; 7—upper Permian Longtan formation; 8—CSAMT line PM01 position; 9—rivers

图1 区域地质

Fig. 1 Regional geological map

### 1.2 研究区地层岩性及断裂构造

研究区位于观音峡背斜西翼槽谷地带,区内地层由表1所示,出露地层较为齐全,主要有二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、新近系、第四系等,研究区地质如图2所示。研究表明,嘉陵江组二段( $T_{1j}^2$ )、四段( $T_{1j}^4$ ),飞仙关组三段( $T_{1f}^3$ )为岩溶发育主要地层;飞仙关组二段( $T_{1f}^2$ )、四段( $T_{1f}^4$ )的泥岩为主要隔水层。测区内发育压扭性逆冲断层  $F_3$ , 断层发育于背斜西翼近轴部,走向与背斜轴线大体一致,在中梁镇以北走向北偏东  $35^\circ$ ,中梁山向南渐变为北偏东  $15^\circ \sim 5^\circ$ ,倾向 SE,倾角  $60^\circ \sim 80^\circ$ 。地面断开地层为飞仙关组至须家河组,断距  $40 \sim 180$  m。

表1 研究区地层岩性

Table 1 Stratigraphic lithology in the study area

地层	岩性
第四系(Q)	砂黏土
须家河组( $T_3xy$ )	长石砂岩、粉砂质泥岩、页岩、粉砂岩
雷口坡组( $T_2l$ )	白云岩
嘉陵江组四段( $T_{1j}^4$ )	盐溶角砾岩、灰质白云岩
嘉陵江组三段( $T_{1j}^3$ )	微晶灰岩、微晶白云质灰岩、砂屑灰岩
嘉陵江组二段( $T_{1j}^2$ )	盐溶角砾岩、灰质白云岩
嘉陵江组一段( $T_{1j}^1$ )	微晶灰岩、泥晶灰岩
飞仙关组四段( $T_{1f}^4$ )	页岩、泥岩、泥质灰岩
飞仙关组三段( $T_{1f}^3$ )	厚层块状砂屑灰岩、微晶灰岩、泥质灰岩
飞仙关组二段( $T_{1f}^2$ )	泥岩
飞仙关组一段( $T_{1f}^1$ )	钙质泥岩、泥质灰岩

### 1.3 岩溶发育规律及特征

区内可溶性岩绝大部分分布于研究区槽谷内,少部分分布于槽谷边缘,在背斜核部,即山脊线附近局部分布有二叠系可溶岩。而部分地区山岭地段主要分布地层为须家河组及其以上新地层,该地段主要以隐伏岩溶形式发育。

可溶岩从地层时代上具有中心向外越来越新的特点,中心地带局部范围出露二叠系灰岩夹薄层页岩,外侧依次为飞仙关组一、二段泥岩、页岩夹灰岩、泥灰岩,三段灰岩,四段页岩夹泥灰岩,飞仙关组外侧嘉陵江组和雷口坡组地层岩性由内到外为灰岩夹角砾状灰岩—薄层状泥质灰岩钙质页岩—页岩,此类分布特征十分有利于岩溶水在灰岩与页岩交界处的灰岩一侧聚集,形成岩溶强烈发育且十分富水地带。本次调查发现暗河及大泉主要分布在飞仙关组三段与四段接触带、雷口坡组和嘉陵江组地层交界处及雷口坡组与须家河组接触带,该现象也是区内岩溶发育的佐证。

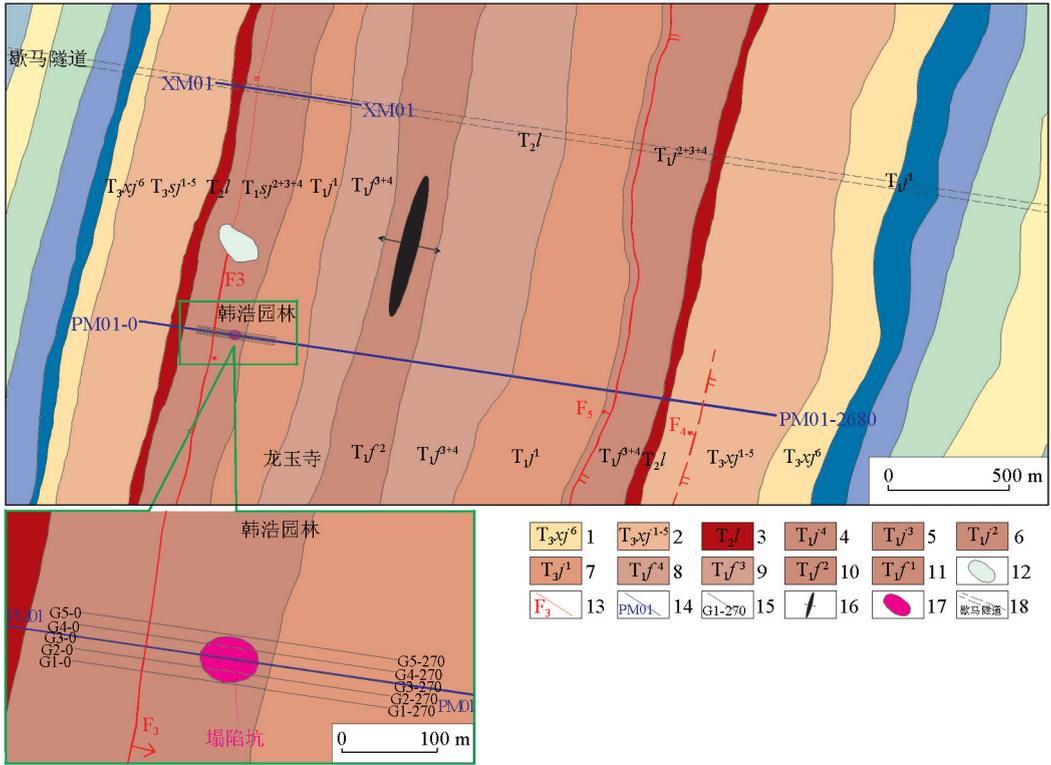
### 1.4 地球物理特征

在研究区及周边采集了多组岩石标本,分布范围较广,具有一定的代表性,物性标本统计见表2所示,据统计结果可见,黏土、溶洞充填物、炭质板岩、

泥岩、页岩、砂岩表现为低阻特征,盐溶角砾岩表现为中高阻,灰岩类则为明显的高阻特征。

溶洞填充物平均密度为  $1.16 \text{ g/cm}^3$ ,均低于其他各类岩石,尤其是与溶洞较为发育的灰岩相比较,密度差可达  $-1.44 \text{ g/cm}^3$ 。为了正演溶洞在地表引起的重力异常,设置了一个直径  $5 \text{ m}$  的圆形溶洞模型,埋深距离地表  $50 \text{ m}$ ,溶洞填充物密度为  $1.16 \text{ g/cm}^3$ ,

溶洞围岩密度为  $2.60 \text{ g/cm}^3$ ,在 GeoIPAS V4.02 软件重磁正反演模块中进行正演计算,溶洞模型在其正上方可产生  $-0.785 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  的重力异常。若溶洞未填充,空腔内是空气(标准状况下为  $0.001293 \text{ g/cm}^3$ ),在其正上方的地表处可产生  $-1.315 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  重力异常,由此可见重力异常非常明显。因此研究区具备 CSAMT、微重力勘查的地球物理前提。



1—须家河组上段;2—须家河组下段;3—雷口坡组;4—嘉陵江组四段;5—嘉陵江组三段;6—嘉陵江组二段;7—嘉陵江组一段;8—飞仙关组四段;9—飞仙关组三段;10—飞仙关组二段;11—飞仙关组一段;12—天池;13—实测断层;14—CSAMT 剖面线;15—微重力剖面线;16—背斜标志;17—岩溶塌陷区;18—歌马隧道

1—upper Xujiahe formation;2—lower Xujiahe formation;3—Leikoupo formation;4—4th member of Jialingjiang formation;5—3rd member of Jialingjiang formation;6—2nd member of Jialingjiang formation;7—1st member of Jialingjiang formation;8—4th member of Feixianguan formation;9—3rd member of Feixianguan formation;10—2nd member of Feixianguan formation;11—1st member of Feixianguan formation;12—Tianchi;13—measured fault;14—CSAMT section line;15—microgravity section line;16—anticlinal sign;17—karst collapse area;18—Xiema tunnel

图 2 研究区物探剖面布置及地质略图

Fig. 2 Geophysical profile layout and geological sketch in the study area

表 2 岩石物性参数统计

Table 2 Statistical table of rock material parameters

岩石名称	电阻率 $\rho_s / (\Omega \cdot \text{m})$		密度 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	
	变化范围	均值	变化范围	均值
黏土	39.2~47.6	43.8	1.3~1.6	1.45
溶洞填充物	15.3~17	16.1	1~1.4	1.16
炭质板岩	90~119	103	1.7~2	1.83
含炭质泥岩	393~941	585	1.4~1.7	1.55
盐溶角砾岩	2 972~4 124	3 446	2.3~2.7	2.5
岩屑长石砂岩	1 035~1 289	1 140	2.1~2.4	2.31
页岩	97.6~108.1	101	2.3~2.8	2.54
泥岩	77~103.1	86.8	1.7~1.9	1.81
砂岩	99.3~130.9	113.6	2.2~2.5	2.35
石英砂岩	872~981.3	915	2.4~2.7	2.55
灰岩	2 026~21 775	9 516	2.3~2.9	2.6
泥灰岩	750.9~1 070	957	2.3~2.6	2.45

## 2 方法技术及资料处理

### 2.1 CSAMT

CSAMT 是以有限长接地电偶极子为场源,在距偶极中心一定距离处同时观测电、磁场参数的一种人工源方法,本次采用赤道偶极装置进行标量测量,同时观测与场源平行的电场分量  $E_x$  和场源正交的磁场分量  $H_y$ ,计算卡尼亚电阻率<sup>[6-8]</sup>。其计算公式为:  $\rho^{E_x/H_y} = |E_x/H_y|^2/5f$ ,式中  $f$  为频率,当从低频到高频逐渐改变频率时,每个频率得到一个卡尼亚电阻率,因而可得到卡尼亚电阻率随频率变化的曲线。

CSAMT法工作效率高、勘探深度大、水平方向分辨能力强,具有较好的探知效果。

2.1.1 前期试验

在勘探前,对CSAMT进行了方法有效性试验,针对研究区勘察钻孔资料丰富的歌马隧道开展CSAMT试验测量,以钻孔CK101为中心,穿越须家河组、雷口坡组、嘉陵江组以及飞仙关组4段岩层布设,长度为600m,CSAMT物理测量点31个,其目的是以已有钻孔资料对比CSAMT测量结果,分析地层岩性以及岩溶发育情况与可控源音频大地电磁测深电阻率断面的对应关系。经过多次调整测量参数及二维反演参数,确定了数据采集、信号发射、反演的最佳参数,如表3所示。用试验最佳参数采集的数据及反演结果与实际地质及钻孔资料基本吻合(图3),效果较好,为后期勘探线测量线提供了参数保障。

表3 CSAMT测量及反演参数

Table 3 CSAMT measurement and inversion parameters

类型	项目	参数
发射源参数	发射源偶极 AB 距	1200 m
	收发距	6 000~7000 m
测量参数	采样频率	1~8192 Hz
	最低反演频点	32 Hz
反演参数	反演初始层厚	8.5 m
	反演层厚递增系数	1.08
	反演层数	28

2.1.2 资料处理

CSAMT数据处理过程中,首先将\*.raw格式原始数据转化为\*.FLD格式文件,查看单点曲线,对干扰引起的突变点进行剔除,将编辑好的\*.FLD文件转化为\*.AVG格式文件。其次进行近场校正,把各个频点数据转化成可以利用卡尼亚电阻率公式计算的远区数据,同时对有明显静态位移的曲线进行静态校正,各项校正完成后进行反演。将频率域数据转换成深度的 $\rho_s$ 断面图,在此基础上结合地质资料进行解释,研究 $\rho_s$ 断面与实际地质及构造特征的关系。

2.2 微重力

微重力测量一词最早出现在20世纪70年代,当时是指在一个较小范围内进行的高精度重力测量,多用于工程勘察、资源开发、小构造探测等方面,近年来在岩溶勘查方面取得了较好的探测效果[9-13]。本次微重力测量共布设5条剖面线(图2),每条剖面长330m,线距5m,点距5m,测线方向98°,布格重力异常总均方误差 $\varepsilon(\Delta g_b)$ 为 $\pm 0.017 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。资料处理包括:

1) 固体潮改正

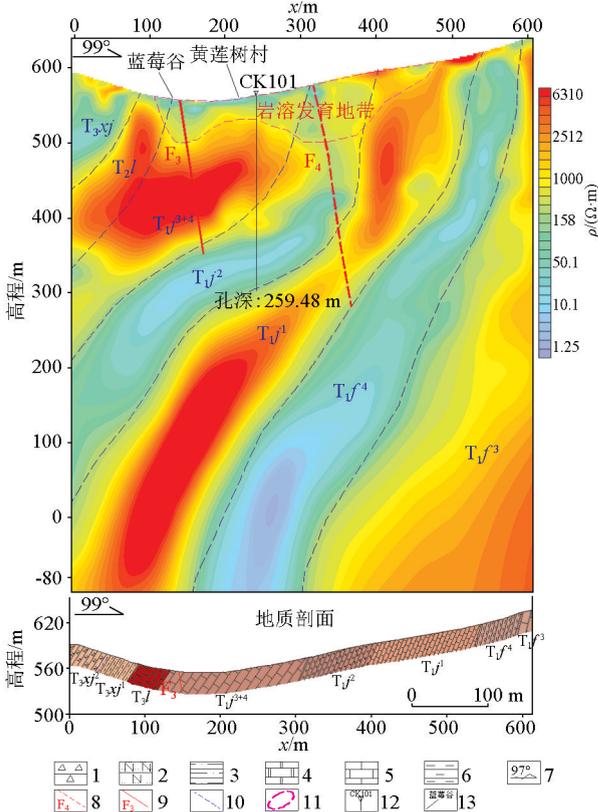
由于日、月等星体的共同作用,使得弹性地球表面发生周期性涨落,从而使重力观测值发生变化,这种变化的量级可达 $(0.2\sim 0.3) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,因此必须从理论上进行精确计算并予以清除,本次采用GeoIPAS4.2软件进行改正。

2) 漂移改正

CG-5是石英弹簧重力仪,由于仪器自身的弹性疲劳等原因,其观测值一般都含有一定的漂移量。但由于拉科斯特重力仪内恒温精度高,漂移小,一般呈线性,而且测线上闭合时间较短,选用线性漂移改正模型,可以较好地消除这一影响。

3) 高度改正、维度改正

对于同一观测点,仪器安置的高度、位置不同,其重力观测值也不同。本次高度、纬度采用金维GeoIPAS V4.2进行改正。



- 1—盐溶角砾岩;2—长石砂岩;3—粉砂质泥岩;4—白云岩;5—灰岩;
- 6—泥岩;7—剖面方向;8—推测断层;9—实测断层;10—推测地层界限;
- 11—推测岩溶发育地带;12—勘察钻孔;13—地物标注
- 1—salt soluble breccia; 2—arkose; 3—silty mudstone; 4—dolomite; 5—limestone;
- 6—mudstone; 7—section direction; 8—presumptive fault; 9—measured faults;
- 10—estimate stratigraphic boundaries; 11—speculate karst development zone;
- 12—survey boreholes; 13—ground object labeling

图3 CSAMT测量试验剖面2D反演电阻率断面及解释 Fig. 3 CSAMT measurement test section 2D inverted resistivity section and interpretation

4) 地形改正

地形改正接近区(0~20 m)、中区(20~500 m)、远区(500~2 000 m)分别进行。

近区地改采用野外实地测量方法,分0~20 m八方位。中区地改(20~500 m)采用在国家地理信息中心购买的该地区1:1万DEM高程数据库,在金维GeoIPAS4.2软件中计算中区地改。远区地改(500~2 000 m)利用1 km×1 km节点高程资料,采用平面公式计算。

5) 小波分析剩余场提取法

利用重力数据研究岩溶塌陷区时,需要采用合适有效的数据处理方法进行重力场异常信息的分离,提取出与研究对象相关的信息部分,进而对场源所引起的局部场异常进行分析研究[8-9]。根据小波多尺度分解原理,重力异常可分解为[10-13]:

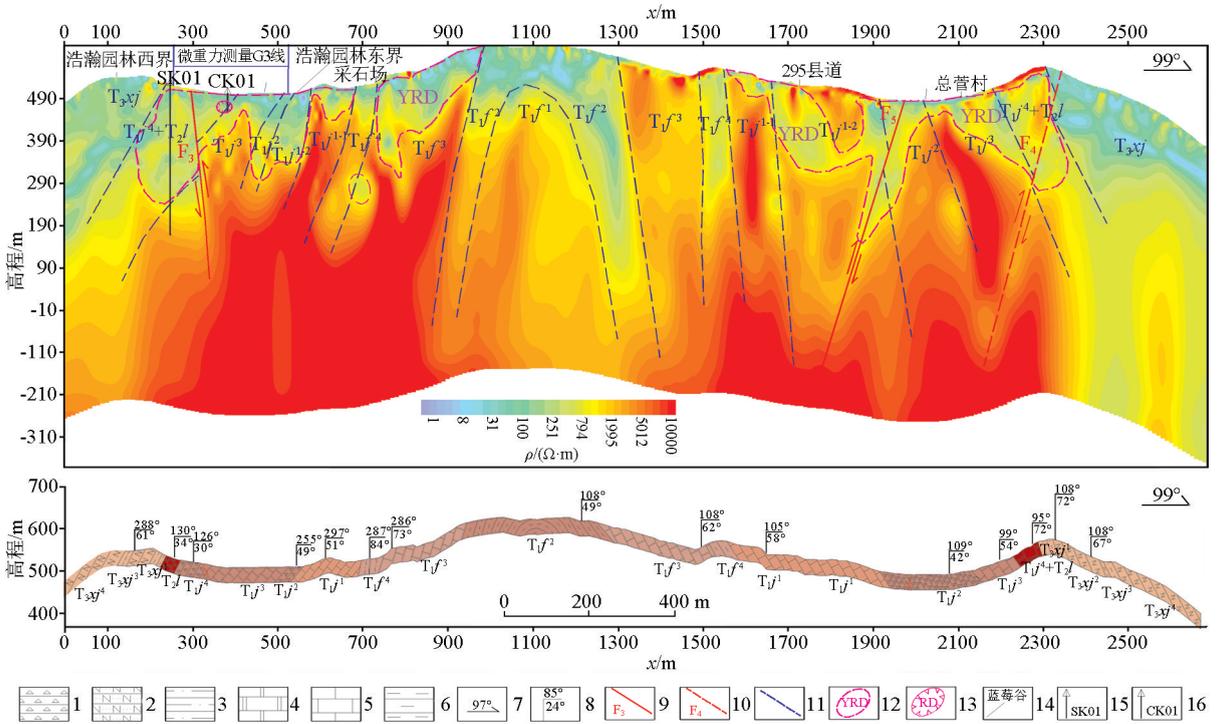
Δg(x,y) = A<sub>i</sub>+D<sub>i</sub>+D<sub>i-1</sub>+...+D<sub>1</sub>, (1)

其中:A<sub>i</sub>为重力异常的i阶近似,即重力异常的低频成分;D<sub>i</sub>(i=1,2,...)为经i次分解后得到的各阶小波细节,即重力异常的高频成分[14]。为了将岩溶塌陷引起的异常从总的重力异常中分离出来,我们用二维重力异常分解双正交小波基函数,对重力场动态变化异常进行小波多阶尺度分解,从而提取浅中部的岩溶塌陷异常。

3 结果分析

3.1 CSAMT 划分岩性界面、识别岩溶发育区

CSAMT 测量 PM01 线二维反演断面见图 4,电阻率断面中具有明显的垂向分层特点,并且高低阻相间分布。在0~215 m 以及 2 295~2 680 m 所在段主要表现为低阻特征,电阻率变化在1~630 Ω·m 之间,与其相邻的中高阻电性层以密集的等值线分割。结合地质测量剖面以及岩石物性特征,推测该电性层主要为须家河组(T<sub>3xy</sub>)粉砂质泥岩、页岩、粉砂岩等。在305~2 295 m 所在段主要表现为中高阻特征,其间穿插多条低阻电性带,高阻电阻率变化在1 000~400 000 Ω·m 之间,对比地质测量剖面及物性统计结果,推测高阻电性带主要为嘉陵江组一段(T<sub>1j<sup>1</sup></sub>)、嘉陵江组三段(T<sub>1j<sup>3</sup></sub>)微晶灰岩、泥晶灰岩,飞仙关组三段(T<sub>1f<sup>3</sup></sub>)薄至中厚层块状砂屑灰岩、微晶灰岩。中低阻电性带电阻率变化在630~1 000 Ω·m 之间,结合地质剖面主要为嘉陵江组二段(T<sub>1j<sup>2</sup></sub>)、四段(T<sub>1j<sup>4</sup></sub>)厚层块状盐溶角砾岩、块状盐溶角砾岩。低阻电性带变化在30~630 Ω·m 之间,主要为飞仙关组二段(T<sub>1f<sup>2</sup></sub>)、四段(T<sub>1f<sup>4</sup></sub>)钙质泥岩、粉砂质泥岩、页岩及泥质灰岩不等厚互层。



1—盐溶角砾岩;2—长石砂岩;3—粉砂质泥岩;4—白云岩;5—灰岩;6—泥岩;7—剖面方向;8—岩层产状;9—实测断层;10—推测断层;11—推测地层界限;12—推测岩溶发育地带;13—溶洞;14—地物标注;15—水文观测钻孔;16—勘察钻孔  
1—salt soluble breccia; 2—arkose; 3—silty mudstone; 4—dolomite; 5—limestone; 6—mudstone; 7—section direction; 8—strata occurrence; 9—measured faults; 10—presumed fault; 11—estimate stratigraphic boundaries; 12—karst development zone is presumed; 13—cave; 14—ground object labeling; 15—hydrological observation borehole; 16—survey borehole

图4 CSAMT 测量 PM01 剖面 2D 反演电阻率断面及解释  
Fig. 4 CSAMT measures PM01 profile 2D inversion resistivity section and deciphering

位于西槽附近的剖面 300 m 处,在 210 号点附近,根据电性特征可以看出一朝东错动的电性带,对比地质资料,与  $F_3$  断裂带位置及倾向吻合,故推测该错动为白庙子逆断层( $F_3$ )的反映。位于东槽中部近 SN 走向顺层发育的串珠状落水洞,在电阻率断面上表现为朝西倾斜的狭窄低阻电性带,为逆断层( $F_5$ )的反映。位于背斜东翼 2 350 号点附近,嘉陵江组三段( $T_{J^3}$ )有一朝西倾斜的低阻电性带,推测可能存在一隐伏的断裂构造。根据电性特征划分的地层界限清晰地反映出观音峡背斜构造,可见观音峡背斜以核部为中轴两翼较为对称。

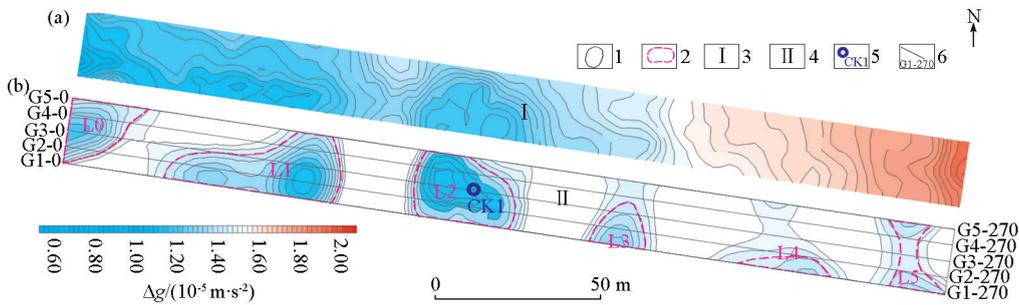
### 3.2 微重力识别溶洞

根据电性特征结合地质资料以及实地测量过程中的调查情况,共推测圈定了 2 处岩溶发育带,岩溶-1 位于西槽,岩溶-2 位于东槽。微重力测量以 CSAMT 圈定岩溶-1 为研究区,选取浩瀚园林内一处

地面沉降为中心,布置了 5 条微重力剖面,测网为 5 m×5 m。

根据微重力测量布格异常、自由空间异常、剩余重力异常等值图(图 5)可见:布格重力异常表现为西低东高的趋势,反映出测区基底西深北浅;对布格重力进行小波分析剩余场提取,除去边界影响后,共圈定 6 处微重力低异常,分别为 L0、L1、L2、L3、L4、L5 重力低异常,由剩余异常场可以看出异常界限清晰,尤其是 L2 异常为已知溶洞塌陷位置,其位置及范围与地面塌陷情况基本吻合,其余异常为新圈定隐伏溶洞引起的重力低异常。

选取中心剖面线 G3,采用 GeoIPAS4.2 软件进行二度半重力剖面联合反演(图 6),该剖面均穿过上述已圈定的塌陷溶洞 L0、L1、L2、L3、L4、L5 重力低异常区。经反演圈定塌陷溶洞特征如表 4 所示。



1—重力异常等值线;2—圈定岩溶塌陷范围;3—布格重力异常等值线图;4—小波分解提取的剩余重力异常等值线图;5—勘察钻孔;6—微重力测线及编号  
1—gravity anomaly isoline; 2—delineate the scope of karst collapse; 3—bouguer gravity anomaly contour map; 4—residual gravity anomaly contour map extracted by wavelet decomposition; 5—survey boreholes; 6—microgravity survey line and number

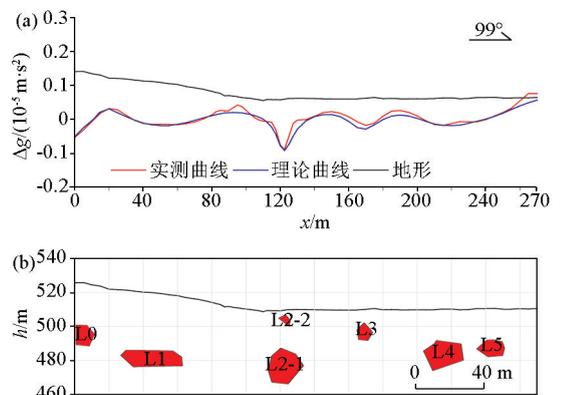
图 5 布格异常(a)、剩余重力异常(b)等值线

Fig. 5 Contour map of bouguer gravity anomaly (a) and residual gravity anomaly (b)

### 3.3 钻孔验证

在重力低异常 L2 处施工了勘察钻孔 CK1,钻孔显示在 0~6.3 m 为第四系黏土,6.3~24.3 m 为嘉陵江组四段白云质灰岩,24.3~32.3 m 为溶洞填充物。可见埋深在 24.3~32.3 m 范围内为塌陷溶洞,与微重力分析反演的溶洞的位置和深度相符合,表明利用小波分析提取剩余重力异常圈定的岩溶塌陷范围,以及利用二度半重力剖面联合反演得到的溶洞空间分布特征较为可靠。在 CSAMT 测量剖面 260 m 处施工了水文观测孔 SK01,孔深 350.5 m,钻孔资料显示,在 0~4.65 m 为第四系黏土;4.65~265.10 m 为嘉陵江组第四岩性段,岩性以角砾岩为主,岩溶现象较为发育,部分地段岩溶发育强烈,溶蚀面可见浅黄色黏土;265.10~350.53 m 为嘉陵江组第三岩性段,岩性主要为白云质灰岩,岩溶现象弱发育,岩心较为完整。从钻孔验证情况来看,

CSAMT 解释的岩土界面及强岩溶发育带与实际情况较为吻合。



$\rho_{L0}=0.8 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L1}=0.8 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L2-1}=1.5 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L2-2}=0.2 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L3}=0.8 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L4}=1.5 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{L5}=1.5 \text{ g/cm}^3$

图 6 剩余重力异常(a)及 2.5D 反演(b)

Fig. 6 Residual gravity anomalies (a) and 2.5D inversions (b)

表4 二度半反演圈定塌陷异常体特征

Table 4 Two-degree half-inverted circle fixed collapse abnormal body features

异常编号	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	体积/ $m^3$	平面距离/m	顶界埋深/m
L0	0.8	640	0~10	24.7
L1	0.8	12000	30~70	24.4
L2-1	1.5	15625	110~130	23.2
L2-2	0.2	48	120~126	3.6
L3	0.8	180	165~174	8.0
L4	1.5	9350	203~227	18.7
L5	1.5	3888	235~251	18.3

## 4 结论

本次研究区岩溶发育强烈,受大型隧道工程施工抽水影响,地面塌陷频繁<sup>[14-17]</sup>,利用CSAMT可较好地划分区内岩土界面以及强岩溶发育带,同时CSAMT对断裂构造反应灵敏,可较好地反映并发现隐伏断裂带在深部倾向及延伸情况。

微重力可对CSAMT圈定的强岩溶发育带进一步剖析,通过提取剩余场圈定岩溶塌陷区位置、埋深、规模及空间分布情况,后期钻孔验证结果与推测圈定的溶洞情况基本吻合,说明微重力测量在岩溶塌陷区精细化探测中效果较为显著。

CSAMT与微重力方法组合的勘探方法在岩溶塌陷区取得了较好的勘察效果,类似还可以采用的方法组合有:①广域电磁法与微重力组合;②瞬变电磁法与微重力的组合;③高密度电法与地质雷达的组合;④跨孔地震成像法与微重力组合。以上方法技术组合均可为潜在岩溶塌陷区及类似地质灾害防治预警提供科学探查方法技术依据。

## 参考文献(References):

- [1] 李大通,罗雁.中国碳酸盐岩分布面积测量[J].中国岩溶,1983(2):61-64.  
Li D T, Luo Y. Measurement of the distribution area of carbonate rock in China[J]. Chinese Karst, 1983(2):61-64.
- [2] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1993.  
Yuan D X, Zhu D H, Wen J T, et al. Karst science in China [M]. Beijing:Geology Press, 1993.
- [3] 蒋忠诚,裴建国,夏日元,等.我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J].中国岩溶,2010,29(4):349-354.  
Jiang Z C, Pei J G, Xia R Y, et al. The progress and important activities of karst research during the 11th five-year plan period in China [J]. Chinese Karst, 2010,29(4):349-354.
- [4] 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.

- Meng Y, Lei M T. Analysis of the current situation and trend of karst collapse research [J]. Chinese Karst, 2019, 38(3):411-417.
- [5] 刘崧.物探方法在岩溶勘查中的应用综述[J].地质科技情报,1997(2):86-92.  
Liu S. A review of the application of geophysical methods in karst exploration [J]. Geological Scientific Information, 1997(2):86-92.
- [6] 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 comprehensive prospecting method in the investigation of geological disasters of karst subsidence and subsidence in Jinshazhou, Guangzhou [J]. Geophysical Exploration and Geochemical Exploration, 2014,38(3):610-615.
- [7] 岳想平,彭小珂,韩埃洋.CSAMT在水文地质勘查中的应用[J].地下水,2020,42(6):102-105.  
Yue X P, Peng X K, Han A Y. Application of CSAMT in hydro-geological survey [J]. Groundwater, 2020,42(6):102-105.
- [8] 岳想平,何萌,彭小珂.CSAMT在探测隐伏断裂构造与岩层划分中的应用[J].甘肃地质,2018,27(2):93-97.  
Yue X P, He M, Peng X K. The application of CSAMT in detecting the formation of hidden fracture and the division of rock formations [J]. Gansu Geology, 2018,27(2):93-97.
- [9] 贾民育.微重力测量技术的应用[J].地震研究,2000,23(4):452-456.  
Jia M Y. Application of microgravity measurement technology [J]. Seismic Research, 2000,23(4):452-456.
- [10] 刘芳,祝意青,陈石.华北时变重力场离散小波多尺度分解[J].中国地震,2013,29(1):124-131.  
Liu F, Zhu Y Q, Chen S. The discrete wavelets of the variable gravity field in North China are decomposed on a multiscale scale [J]. China Earthquake, 2013,29(1):124-131.
- [11] 杨文采,施志群,侯遵泽,等.离散小波变换与重力异常多重分解[J].地球物理学报,2001,44(4):534-541,582.  
Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, et al. Discrete wavelet transformation and gravity anomaly multi-decomposition [J]. Journal of Geophysics, 2001,44(4):534-541,582.
- [12] 杨文采,郭爱媛,谢玉清,等.重磁异常在频率域的解释方法(上)[J].物化探电子计算技术,1979(1):1-16.  
Yang W C, Guo A Y, Xie Y Q, et al. Method of interpretation of heavy magnetic anomalies in the frequency domain (above) [J]. Physical Exploration Electronic Computing Technology, 1979(1):1-16.
- [13] 侯遵泽,杨文采,王允,等.重力场实数尺度小波分解及其应用[J].地球物理学报,2015,58(3):1035-1041.  
Hou Z Z, Yang W C, Wang Y, et al. The decomposition and application of real-scale wavelets in gravity field [J]. Journal of Geophysics, 2015,58(3):1035-1041.
- [14] 吴咏敬,董平,王良书,等.东北地区构造分区与深断裂研究——基于重力场小波多尺度分解[J].地球物理学进展,2012,27(1):45-57.  
Wu Y J, Dong P, Wang L S, et al. The study of tectonic zoning and

deep fracture in Northeast China—Multi-scale decomposition based on small waves of gravitational field [J]. *Advances in Geophysics*, 2012, 27(1):45-57.

[15] 刁博,王家林,程顺有. 重力异常小波多分辨率分析分解阶次的确定[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2007(4):564-568.  
Diao B, Wang J L, Chen S Y. Gravitational anomaly wavelet multi-resolution analysis of decomposition order [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geology*, 2007(4):564-568.

[16] 陈玉玲,韩凯,陈贻祥,等. 可控源音频大地电磁法在岩溶塌陷

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. Application of controlled source audio geomagnetic method in karst collapse survey [J]. *Advances in Geophysics*, 2015, 30(6):2616-2622.

[17] 邓中俊,杨玉波,姚成林,等. 综合物探在地面塌陷区探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2019, 43(2):441-448.  
Deng Z J, Yang Y B, Yao C L, et al. Application of integrated exploration in ground subsidence detection [J]. *Geophysical Exploration and Geochemical Exploration*, 2019, 43(2):441-448.

### Application of comprehensive geophysical prospecting method in detecting concealed karst collapses

ZHANG Jian<sup>1</sup>, FENG Xu-Liang<sup>2, 3</sup>, YUE Xiang-Ping<sup>3</sup>

(1. *The First Geological Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Geology and Mineral Bureau, Tianshui 741020, China*; 2. *School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*; 3. *Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical and Geochemical Exploration Co., Ltd., Xi'an 710068, China*)

**Abstract:** Karst is widely distributed in China. However, geological disasters frequently occur in karst zones due to the fragile geological environment, which seriously threatens the safety of people's life and property and cause huge economic losses. In this study, the controlled source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT) method and microgravity were used to extract residual gravity anomalies through the two-dimensional inversion of pseudosections and multi-scale wavelet analysis. As a result, rock-soil interfaces of karst zones and the development zones of strong karst were well divided; the locations, burial depths, scales, and spatial distribution of karst caves were delineated. As verified by drilling, the rock-soil interfaces and strong-karst development zones determined by CSAMT interpretation were roughly consistent with those revealed by boreholes, and the sizes and burial depths of collapsed karst caves that were delineated by microgravity roughly correspond to those revealed by boreholes of engineering exploration. These results show that the CSAMT combined with the microgravity method can achieve significant effects in the detection of concealed karst collapses and serves as a scientific detection method for the early warning of the prevention and treatment of potential karst collapses and similar geological disasters.

**Key words:** karst collapse; CSAMT; microgravimetry

( 本文编辑:王萌)