

周学义, 聂俊丽, 龙举. 遵义市某小区复杂溶洞精细化探测及建模[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 147-157. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.012

ZHOU Xueyi, NIE Junli, LONG Ju. Refined exploration and modeling of complex karst in a residential area of Zunyi City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 147-157. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.012

# 遵义市某小区复杂溶洞精细化探测及建模

周学义<sup>1</sup>, 聂俊丽<sup>2</sup>, 龙举<sup>3</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州地质工程勘察设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:**【目的】随着西部大开发战略的实施, 岩溶地质引起的地基力学特性降低问题逐渐显现, 这对工程施工和人民的安全产生了不可忽视的影响。同时, 复杂溶洞由于其隐蔽性, 往往难以被准确探测到, 这进一步增加了工程建设的风险。因此, 建立以定性分析和定量分析相结合的探测方式准确探测和刻画溶洞。【方法】以遵义市某小区楼栋建设项目中溶洞探测为例, 首先采用高密度电法进行场区探测, 得到溶洞的走向、发育范围等资料。其次, 利用3D激光扫描技术获取溶洞形态与三维空间分布详细数据。最后, 将高密度电法探测结果和三维激光扫描结果进行比对分析。【结果】结果显示: 从高密度电法反演结果可知溶洞走向为NNW-SSE, 三维激光建模显示溶洞埋深从北向南逐渐变大, 溶洞的总体积为2795.48 m<sup>3</sup>, 高度在0.5~8.57 m之间, 宽度在1.97~23.34 m之间; 对两种方法结合分析, 得到溶洞平面位置偏差在0~18 m之间, 偏差率为0%~112.5%, 深度偏差在2~8 m之间, 偏差率为8%~33.3%。【结论】结果表明: 利用高密度电法结合三维激光扫描探测溶洞, 从定性分析到定量描述, 获得溶洞的埋深情况、高度变化和发展规模等信息, 以及比对分析得到的偏差率, 能对人为无法进入的溶洞进行标识, 实现对复杂溶洞的精细化探测。可见, 高密度电法和三维激光扫描方法结合, 是溶洞精细化探测的一种有效的技术方法组合。

**关键词:** 复杂溶洞; 高密度电法; 三维激光扫描; 精细化探测; 三维激光建模; 地下水; 流量

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0147-11



## Refined exploration and modeling of complex karst in a residential area of Zunyi City

ZHOU Xueyi<sup>1</sup>, NIE Junli<sup>2</sup>, LONG Ju<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Geological Engineering Survey and Design Institute Co, Ltd, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** [Objective] With the implementation of the strategy of large-scale development of the western region, the problem of reducing the mechanical properties of the foundation caused by karst geology has gradually emerged, which has had a non-

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-11-24; 录用日期: 2024-11-29; 网络出版日期: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(42264008); 贵州省地矿局局管科研项目(黔地矿科合〔2019〕12号)

作者简介: 周学义(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事地球物理勘探、地质工程研究。E-mail: 1985682105@qq.com

通信作者: 聂俊丽(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要从事地球物理勘探研究。E-mail: 42264008@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

negligible impact on the construction of the project and the safety of the people. At the same time, complex karst caves are often difficult to be accurately detected due to their concealment, which further increases the risk of engineering construction. Therefore, a combination of qualitative and quantitative analysis was established to accurately detect and characterize karst caves. [Methods] Taking the karst cave detection in a residential building construction project in Zunyi City as an example, firstly, the high-density electric method is used to detect the field area, and the data of the direction and development range of the karst cave are obtained. Secondly, 3D laser scanning technology was used to obtain detailed data of karst cave morphology and three-dimensional spatial distribution. Finally, the high-density electrical detection result and the 3D laser scanning result were compared and analyzed. [Results] The result show that the cave strikes NNW-SSE from the high-density electrical inversion result, and the 3D laser modeling shows that the buried depth of the cave gradually increases from north to south, and the total volume of the cave is  $2\,795.48\text{ m}^3$ , the height is between  $0.5\sim 8.57\text{ m}$ , and the width is between  $1.97\sim 23.34\text{ m}$ . The combination analysis of the two method shows that the plane position deviation of the karst cave is between  $0\sim 18\text{ m}$ , the deviation rate is  $0\%\sim 112.5\%$ , and the depth deviation is between  $2\sim 8\text{ m}$ , and the deviation rate is  $8\%\sim 33.3\%$ . [Conclusion] The result show that the high-density electrical method combined with 3D laser scanning can be used to detect karst caves, from qualitative analysis to quantitative description, the information of the buried depth, height change and development scale of karst caves, as well as the deviation rate obtained by comparative analysis, which can identify karst caves that cannot be entered by humans, and realize the fine detection of complex karst caves. It can be seen that the combination of high-density electrical method and 3D laser scanning method is an effective combination of technical method for fine detection of karst caves.

**Keywords:** complex karst cave; high density electrical method; three-dimensional laser scanning; fine detection; 3D laser modeling; grouhwater; flow

## 0 引言

我国岩溶地质分布广泛, 占国土总面积的  $36\%$ <sup>[1]</sup>。随着西部大开发战略的实施, 越来越多的工程项目开始在岩溶地区展开, 复杂溶洞地基的稳定性问题威胁到上部结构的安全, 例如地面塌陷、建筑倒塌等危害, 同时也会给工程施工带来安全隐患。因此, 为了确保工程安全和稳定, 对复杂溶洞进行精细化探测显得尤为重要。

目前, 针对溶洞探测, 主要是物探与钻探结合的综合探测方法<sup>[2-11]</sup>。其中物探方法主要是采用瞬变电磁法<sup>[12-15]</sup>、地质雷达法<sup>[16-17]</sup>、钻孔 CT 法<sup>[18-19]</sup>、地震映像法<sup>[20]</sup>、高密度直流电法<sup>[21-26]</sup>等。然而, 各种物探方法在探测溶洞时都存在着不同的局限性, 瞬变电磁法探测深度较大, 但在有金属物的情况下受干扰严重。地质雷达能够提供地下空洞的位置和形态信息, 但在高电导率地质环境下, 信号穿透性较差, 影响其在深部溶洞探测方面的效果, 且探测深度有限, 容易受周围环境干扰影响。钻孔 CT 需要先施钻, 然后在不同钻孔之间进行, 仅可测得空间地质情况。地震映像能够探测地下岩层的结构和变化, 但地震波的反射和折射情况较为复杂, 使得探测结果具有一定的不确定性。高密度电法是一种以地下介质电阻率差异为基础的物探技术, 在具备良好的接地条件、无工业

电流干扰和浅层地层呈现较低电阻率的环境中, 表现出高效经济的探测优势。运用到溶洞探测及勘察工程的实际应用中, 能够提供满意的探测结果。结合研究区并没有过高或过低的电导屏蔽层存在, 物理环境背景较为清晰、稳定, 适宜高密度电法的有效开展。因此选用高密度电法作为本研究区的探测方法, 但是高密度电法的反演结果是二维的, 只能实现定性分析, 无法对溶洞内部形态进行准确呈现<sup>[21]</sup>, 需要结合其他方法对溶洞进行综合探测。

近年来, 三维激光扫描技术在各行业得到广泛应用<sup>[27-32]</sup>, 如桥梁、塔基和矿区采空区等, 但是应用在溶洞探测方面还比较少。其中冯正茂等<sup>[21]</sup>针对溶洞内部能见度低、地质条件复杂的环境, 利用三维激光扫描技术研究溶洞内部结构, 量化溶洞空间信息。李红梅等<sup>[31]</sup>利用三维激光扫描的点云数据建模, 准确分析溶洞与桥墩的距离, 保障施工安全。聂品<sup>[32]</sup>对某隧道溶洞进行了三维激光测量与建模分析, 得到了溶洞的详细信息, 为工程提供了参考依据。因此, 三维激光具有精准得到溶洞规模、大小和形态的优势, 结合高密度电法的探测结果, 实现对溶洞的定性、定量分析。这种方法已经得到了一些学者的研究和应用, 例如王永刚等<sup>[33-35]</sup>将高密度电法和三维激光扫描结合起来, 对塔基岩溶、采空区进行精准探测, 结果表明两种方法结合能更精确的探测岩溶, 降

低多解性。WANG 等<sup>[36-38]</sup>利用物探方法对溶洞进行定位, 然后采用三维激光扫描得到溶洞的形态。综上, 高密度电法与三维激光扫描结合起来的方法, 主要应用在塔基、矿区采空区等, 但应用在市政工程中探测溶洞的研究较为欠缺, 且很少有将两种方法结合起来探测溶洞的研究。

上述研究中, 物探方法在探测时各自存在一定的局限性, 其中高密度电法主要是作为定性分析, 缺点是存在体积效应, 无法对溶洞的发育范围准确的圈定。目前为了弥补高密度电法探测的局限性, 主要通过结合钻探、三维激光等定量分析结果和电法结果互相佐证, 得到溶洞的详细展布, 经过三维激光扫描和电法对比分析获取两种方法的偏差, 以达到为无法开展三维激光扫描的区域进一步确定溶洞范围的目的。

本文针对遵义市某小区中的复杂溶洞, 首先通过高密度电法对溶洞进行定性分析, 划定溶洞平面展布范围, 再结合三维激光扫描实现复杂溶洞的定量分析, 得到溶洞的具体空间展布和数值, 并对三维激光扫描结果和高密度电法的结果进行比对分析, 实现定性分析与定量分析相结合, 为高密度电法识别溶洞的精准度提供依据和小区工程施工提供地质保障。

## 1 测区地质环境

研究区主要为山峦斜坡, 其间发育有冲沟, 地形北高南低, 根据区域地质图(见图1)可知研究区并未处于断层带上, 结合现场地质调查, 研究区遭受现状地质灾害的危害程度小。综合研究区钻孔资料和地质调查结果, 出露的地层岩性主要为: 第四系杂填土( $Q_4^m$ )、第四系坡残积( $Q_4^c$ )红黏土、奥陶系(O)泥灰岩、石灰岩。杂填土的主要成分是红黏土、碎石块和建筑垃圾, 平均厚度为 2.90 m, 分布于整个场地; 红黏土由残坡积亚黏土、含砂质黏土、碎石黏土构成, 分布不连续; 下覆基岩主要是奥陶系上统和中统中风化~强风化的泥灰岩、石灰岩, 节理裂隙发育, 岩体较破碎, 岩溶发育, 存在大型岩溶洞穴(见图2)。调查发现历史背景中曾将该溶洞用作防空洞。

岩溶地区第四系杂填土和红黏土一般呈低阻反应, 若是存在碎石充填, 局部表现为中高阻。对于灰岩一般呈高阻反映, 若灰岩中存在溶洞, 溶洞无充填物或存在少量充填物时, 视电阻率反演剖面呈高阻异常, 若有水、泥质充填时, 呈低阻反映。根据研究区现场电阻率测试, 得到如下电性特征: (1)覆盖层, 黏土多表现为低阻特征,  $\rho$  值一般小于  $120 \Omega \cdot m$ ; 局部碎石集中处多表现为中高阻特征,  $\rho$  值一般在

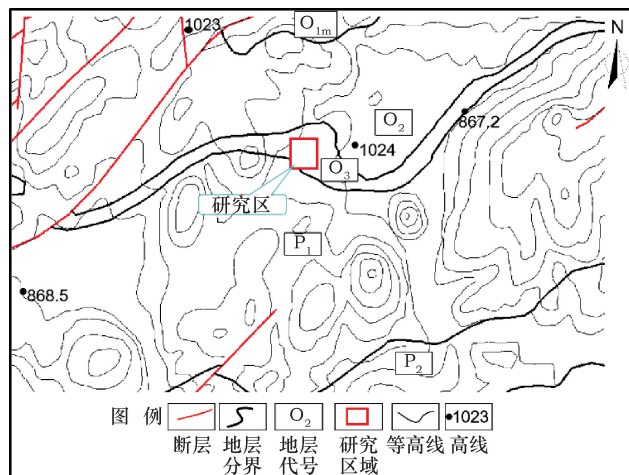


图1 区域地质概况

Fig. 1 Regional geological map



图2 岩溶洞穴及溶蚀裂隙

Fig. 2 Karst caves and dissolution fissures

500~3 000  $\Omega \cdot m$ 。(2)石灰岩基岩, 测区内基岩层主要以灰岩为主, 浅部强风化层及中风化层  $\rho$  值一般在  $1 000 \Omega \cdot m$  以下, 往深部基岩较完整,  $\rho$  值一般在  $1 000 \Omega \cdot m$ ; 完整基岩综合层电性背景值较为稳定, 随  $AB/2$  增加,  $\rho$  值逐渐升高。

## 2 方法原理

高密度电法作为定性分析, 通过测线采集电阻率数据, 分析视电阻率剖面图, 划定溶洞平面展布范围, 再结合三维激光扫描进行入洞探测, 得到溶洞的具体空间展布和数值, 实现复杂溶洞的定量分析。对三维激光扫描结果和高密度电法的结果进行比对分析, 实现定性分析与定量分析相结合, 得到两种方法的偏差, 为无法开展扫描的区域确定溶洞范围提供依据。

## 2.1 高密度电法

高密度电法是利用探测目标体与围岩之间的电性差异来达到识别目标体的方法。通过  $AB$  电极供电,  $MN$  电极测量电位差, 从而得到  $MN$  中点的视电阻率值, 根据实测的视电阻率剖面进行分析与反演, 便可获得地下地层中的电阻率分布情况, 从而可以用于划分地层、判定异常等<sup>[14-19]</sup>。

根据研究区内不同地质体的物理特征可知, 目标体与基岩存在着明显的、并可以量化和识别的电性差异, 满足高密度电测深法开展的前提条件。并且研究区内没有过高或过低的电导屏蔽层存在, 物理环境背景较为清晰、稳定, 周围无大规模的工业游散电流, 适宜高密度电法的有效开展。

结合研究区北高南低的地形条件和岩层走向为  $65^\circ$  的单斜构造, 将测线布置设为: 沿着  $80^\circ$  走向布设 4 条测线、 $328^\circ$  走向布设 2 条(见图 3), 每条测线长度都为 300, 其中  $AB=20\sim 100$  m,  $MN=5$  m, 观测点距 5 m。选用国产的 WGMD-9 超级高密度电法仪, 采用三极、四极的综合方法进行数据采集, 数据采集过程中保证电极与岩层的充分接触, 以获得准确可靠的电阻率数据。

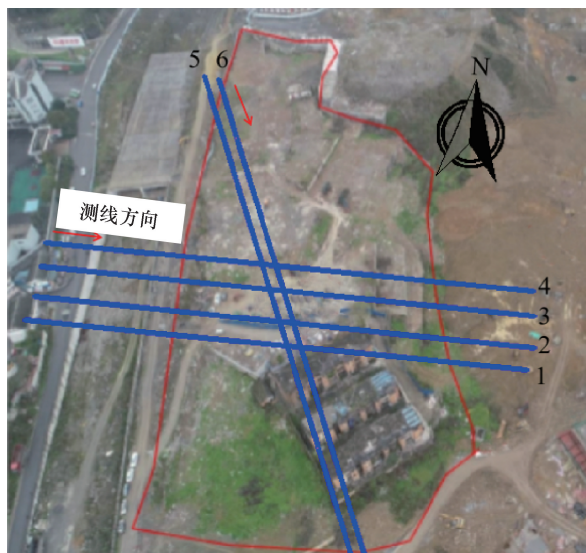


图 3 高密度电法测线布置

Fig. 3 Layout of high-density electrical survey line

## 2.2 三维激光扫描

三维激光扫描是先发射出一束不间断的整数波长的激光, 通过从物体反射回来的激光波的相位差来计算和记录目标物体的距离, 再根据水平向和垂直向的步进角距值, 计算出扫描点的三维坐标, 将空间信息以点云方式记录下来。通过传动装置的扫描运动, 根据设定的扫描范围, 完成对空间的全方位扫

描; 通过处理软件对点云数据进行拼接和三维重构, 真实还原出扫描空间的轮廓大小和空间结构<sup>[22-26]</sup>。

研究区大型溶洞曾经是防空洞, 可以直接进入空洞开展三维激光扫描, 得到全面、清晰的溶洞图像。为了查明大型溶洞的分布规律、规模, 采用奥地利生产的 RIEGL LMS-Z420i 型三维激光扫描仪对溶洞进行三维扫描。通过收集资料和现场调查, 结合高密度电法得到溶洞的大致形态和发育范围, 溶洞内部共设置了扫描站点 9 站, 扫描精度为角分辨率  $0.1^\circ$ 。

扫描从北向南依次开展, 按预定的站点依次架设 RIEGL LMS-Z420i 型三维激光扫描仪开展扫描工作。由于扫描的溶洞长度较大、洞内空间复杂、设置的扫描站点较多, 在扫描站点之间采用徕卡全站仪反射片设置 3~4 个特征点, 便于后期数据处理和模型拼接。溶洞全部扫描完成共获取到 2400 万个有效点云数据。

## 3 分析讨论

### 3.1 视电阻率剖面

根据钻孔揭露资料, 可以看出研究区存在大型溶洞, 结合现场测试的不同地层的电阻率差异, 确定本次探测的解释原则为: (1) 覆盖层: 由黏土、碎屑岩夹黏土组成。在电阻率剖面上黏土呈低阻, 碎屑岩夹黏土呈中高阻。(2) 石灰岩岩层: 属于硬质岩, 强风化和中风化岩层在电阻率剖面上呈高阻。(3) 溶洞: 研究区地下水比较丰富, 水位较高, 且基岩裂隙发育, 溶洞周围裂隙为充水状态, 将溶洞包裹起来, 因此在剖面上, 将高密度电法反演拟电阻率断面中低阻封闭圈、半封闭圈解释为岩溶及岩体裂隙发育带。

根据电阻率反演结果, 结合地质资料和解释原则, 对 6 条测线结果进行解释, 以物探 1 线(见图 4)为例: 在剖面浅部, 视电阻率呈不均匀的低~中高阻变化, 解释为覆盖层, 其中低阻为黏土层, 中高阻为碎石夹黏土。在测线  $90\sim 105$  m (Y1-1 异常点及附近) 段, 呈现水平团块状低阻异常,  $\rho$  值小于  $200 \Omega \cdot \text{m}$ , 结合异常形态及地形地质条件综合分析, 该异常为裂隙发育带, 发育宽度  $12\sim 15$  m, 影响深度  $7\sim 13$  m 范围内; 在测线  $150\sim 180$  m (Y1-2 异常点及附近) 段, 呈现团块状中低阻异常, 结合异常形态及地形地质条件综合分析, 该异常为溶洞, 发育宽度在  $32\sim 35$  m, 影响深度在  $13\sim 20$  m 范围内。

为验证高密度电法探测结果的准确性, 选取物探 1 线 ADK73 与 ADK80 钻孔进行对比验证(见图 4)。可以发现: (1) 反演结果图 ADK73 处为溶洞异常区, 深度  $0\sim 3.0$  m 为低阻分布, 钻孔记录  $0\sim 3.3$  m 为杂

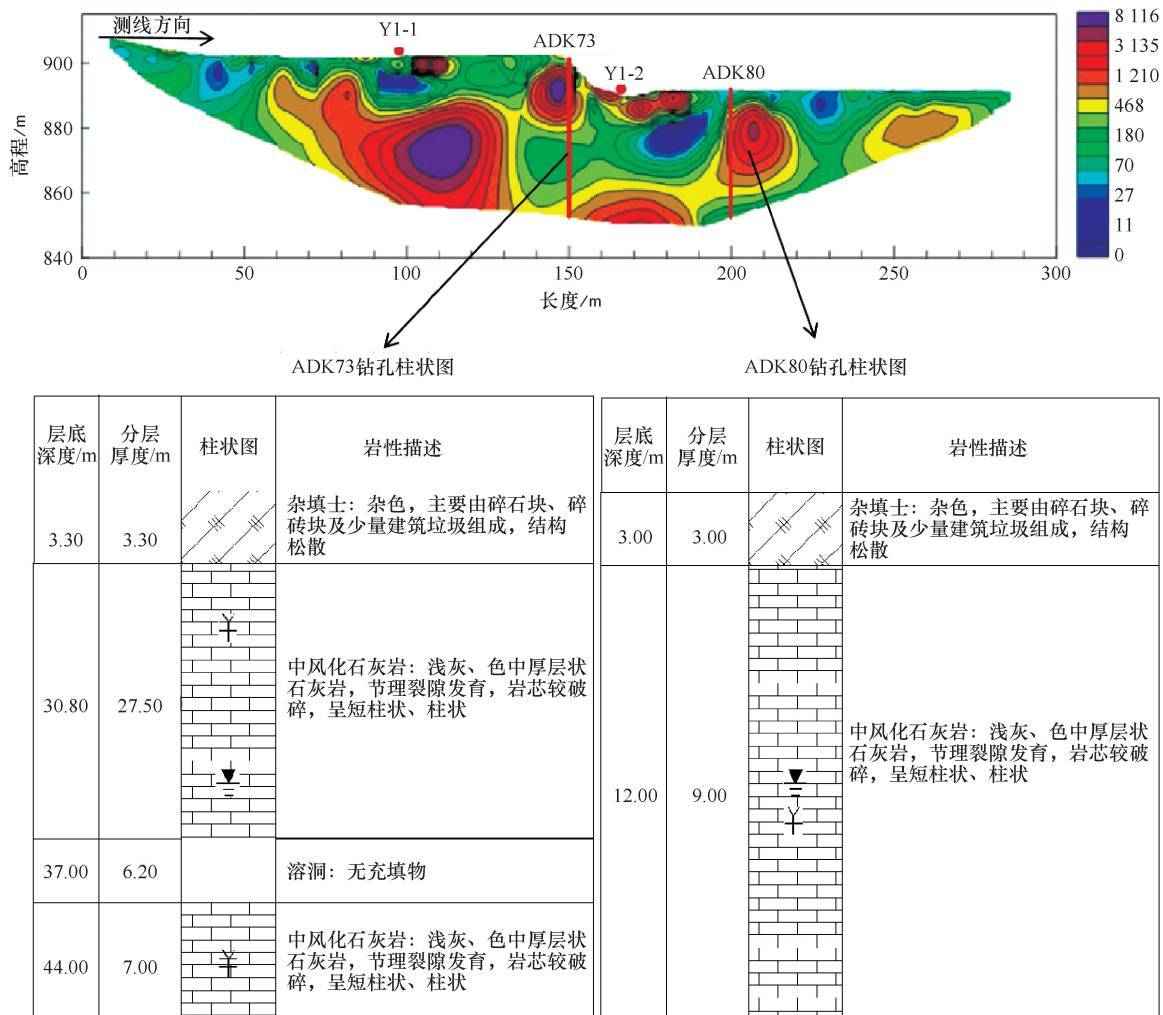


图4 高密度电法地断面图(1线)及钻孔验证

Fig. 4 High-density electric ground section (1 line) and borehole verification

填土; 深度 29~36 m 为低阻异常分布区域, 钻孔显示在 30.8~37 m 为溶洞发育, 虽无充填物, 但根据柱状图中地下水位的位置, 该处水位在溶洞以上, 因此溶洞周围裂隙为充水状态。(2) ADK80 处岩性完整, 深度 0~3 m 为低阻, 3 m 以下为完整灰岩。从两处钻孔数据和反演结果的对比分析可知, 两者结果吻合度较高, 高密度电法在应用于岩溶区探测中具有较好准确性。

根据表 1 中高密度电法视电阻率反演结果, 可以发现, 在研究区内存在裂隙发育带和规模较大的溶洞(见图 5)。主要表现为: (1) 裂隙发育带中有两个异常点(Y3-1、Y4-1), 其宽度为 7~15 m, 深度 5~30 m; (2) 溶洞发育带中有六个异常点(Y1-2、Y2-1、Y3-2、Y4-2、Y5-1、Y6-1), 其宽度为 12~78 m, 深度在 19~40 m 之间变化, 另外两个异常点(Y1-1、Y4-3)在断面上分布深度较浅, 相邻地区基岩完整, 未见异常, 故推断这两个异常点为裂隙带。综合以上

解释所示的异常点分布和大致方向, 可以判断溶洞走向为 NNW-SSE 向, 再根据高密度电法剖面图解释的异常范围圈定溶洞的平面范围。

通过高密度电法获取了溶洞的走向及平面展布范围, 然而其反演结果为二维数据, 仅能进行定性分析无法准确刻画溶洞的空间分布。为了得到溶洞空间分布情况, 利用三维激光扫描技术, 以高密度电法圈定的范围为基础, 进行入洞扫描, 对溶洞进行定量分析。

### 3.2 溶洞空间扫描

#### 3.2.1 三维模型构建

利用三维激光扫描获得溶洞的原始数据, 采用 RiSCAN PRO 软件进行预处理, 通过对各站数据采用公共反射片自动拼接以及人工手动方式进行拼接, 获取溶洞点云数据模型, 将数据导出后利用 Geomagic Studio 软件对点云数据进行消除噪点、不均匀点等方式处理, 基于特征对齐拼接点云数据, 最终还原溶洞

的形态和轮廓(见图6)。

### 3.2.2 模型分析

根据建立的三维模型(见图7), 由于溶洞形态的不规则性, 为测量模拟溶洞尺寸数据, 如图7(a)所示的A、B两点坐标, 即得溶洞尺寸数据为: 长度93.779 m、宽度33.324 m、高度31.004 m。联合钻探数据, 对溶洞埋深、宽度、高度变化和体积大小进行详细分析, 从而实现溶洞的详细勘察。

(1) 溶洞体积。根据三维模型得到的溶洞形态, 将溶洞划分为四个区域[见图7(a)]。利用 Geomagic Studio 软件的测量工具对各个区域体积进行测量, 得到直道、弯道、小厅和大厅的体积数据, 分别为  $221.98 \text{ m}^3$ 、 $437.37 \text{ m}^3$ 、 $266.56 \text{ m}^3$ 、 $1869.57 \text{ m}^3$ , 溶洞总体积为  $2795.48 \text{ m}^3$ 。

(2) 溶洞埋深。由于 Geomagic Studio 软件无法直接获取地面到溶洞的距离, 拟通过钻孔资料结合模型

表1 物探测量异常点推断成果表

Table 1 Inference results of anomalies in geophysical surveys

异常点线号	异常点编号	在测线位置/m	异常形态	异常视宽度/m	异常视深度/m	异常性质推断
1 线	Y1-1	90 ~ 105	低阻团块异常	12 ~ 15	7 ~ 13	裂隙发育带
	Y1-2	150 ~ 180	中低阻团块异常	32 ~ 35	22 ~ 35	溶洞
2 线	Y2-1	130 ~ 155	低阻“V”字形异常	28 ~ 32	20 ~ 40	溶洞
3 线	Y3-1	50 ~ 70	低阻团块异常	7 ~ 15	4 ~ 30	裂隙发育带
	Y3-2	140 ~ 160	中低阻异常	16 ~ 18	19 ~ 39	溶洞
4 线	Y4-1	50 ~ 70	低阻团块异常	7 ~ 15	5 ~ 30	裂隙发育带
	Y4-2	140 ~ 160	中低阻封闭圈异常	12 ~ 13	23 ~ 29	溶洞
	Y4-3	196 ~ 210	低阻团块异常	12 ~ 14	6 ~ 16	裂隙发育带
5 线	Y5-1	130 ~ 170	中低阻异常	48 ~ 51	28 ~ 40	溶洞
6 线	Y6-1	100 ~ 180	中低阻异常	70 ~ 78	21 ~ 36	溶洞

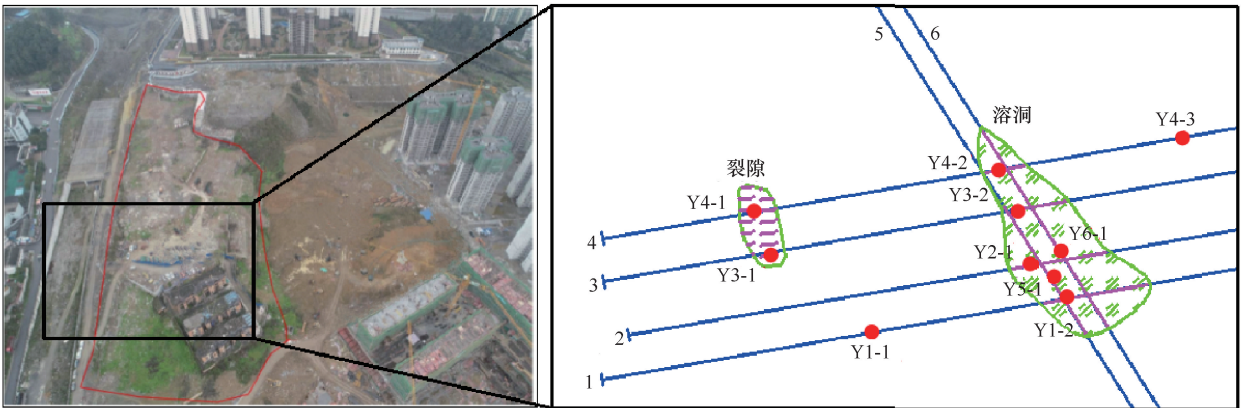


图5 物探解释异常点

Fig. 5 Geophysical interpretation anomaly map

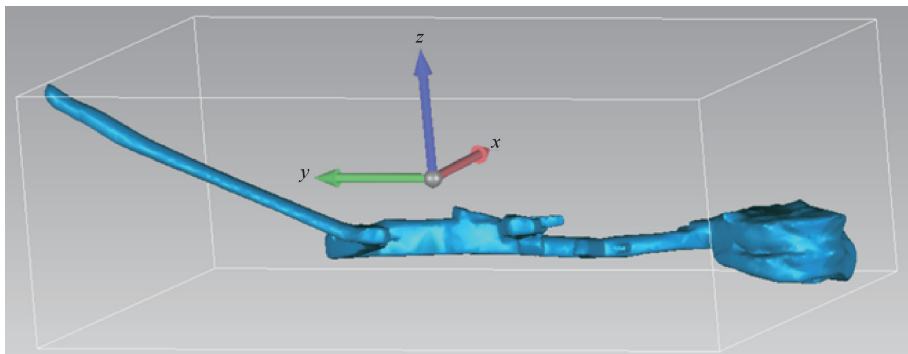
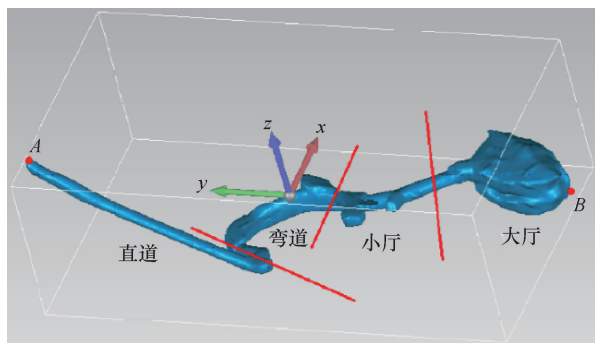
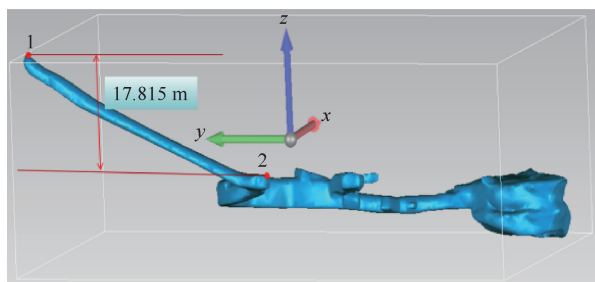


图6 三维模型

Fig. 6 3D model



(a) 溶洞模型分区



(b) 溶洞1、2点埋深高差测量

### 图7 溶洞分析

Fig. 7 Karst cave analysis

得到溶洞埋深。根据钻孔布置图和溶洞平面图, 对比得到: 钻孔 A6ZK25 和钻孔 ADK144 的位置分别与模型中 1 号点、2 号点重叠[见图7(b)]。从两个钻孔的柱状图结合地表高程可知: 两钻孔溶洞顶板埋深高差为 17.9 m, 模型中测量 1、2 号点的高差为 17.815 m, 将以上分别得到的高差进行对比, 二者基本吻合。因此结合钻孔揭露的溶洞埋深, 1 号点坐标设置为(0, 0, 6), 计算溶洞三维模型沿着 Y 轴的顶板埋深。处理后得到溶洞顶板埋深三维柱状图(见图 8)。结果显示: 溶洞的平均埋深为 24.69 m, 最小埋深为 6 m, 最大埋深为 31.64 m; 根据柱状图和高密度电法得到的溶洞走向, 溶洞埋深从北至南逐渐增大, 呈现先陡后缓的趋势。

(3) 溶洞宽度。令模型坐标轴 Z 为 0, 测量溶洞的俯视宽度, 对测量数据进行处理后得到溶洞宽度三维柱状图(见图 9)。结果显示: 宽度最小值为 1.97 m、最大值为 23.34 m、平均值在 6.26 m, 处理得到标准差为 5.72, 证明溶洞宽度波动大。

(4) 溶洞高度。由于溶洞形态呈现不规则条带状, 测量时将溶洞平行于坐标轴 ZOY 的截面分为正面[见图 7(b)]及背面, 对溶洞高度进行测量, 数据处理后得到溶洞高度三维柱状图(见图 10)。结果显示: 高度最小为 0.57 m, 最大为 8.57 m, 平均高度 3.34 m, 溶洞背面的高度变化趋势与正面相似, 变化

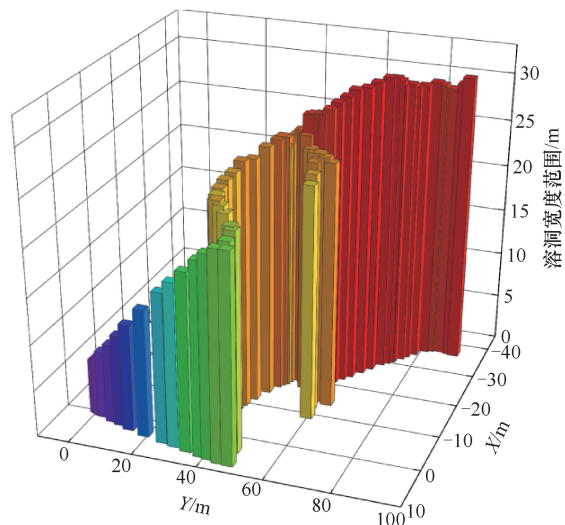


图8 溶洞埋深三维图

Fig. 8 Three-dimensional diagram of the buried depth of the cave

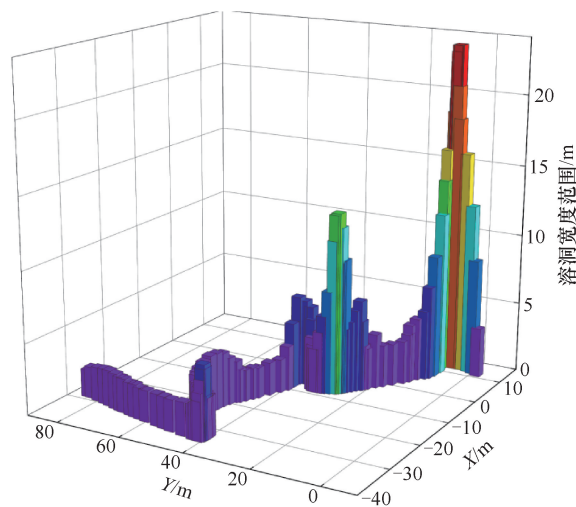


图9 溶洞宽度三维图

Fig. 9 Three-dimensional view of the width of the cave

差距不大, 基本吻合。

### 3.3 对比分析

通过高密度电法与三维激光扫描技术对溶洞进行地面地下一体化探测, 得到高密度电法解释结果和三维激光溶洞模型结果对比平面图(见图 11), 由于溶洞南侧充水, 有一部分溶洞无法用三维激光扫描, 物探 1 线刚好经过该区域, 故对比分析时只对比物探 2 线—6 线, 结合高密度电法解释结果(见表 1)和三维激光溶洞模型得到的结果, 以三维激光溶洞模型为理想值、高密度电法反演结果为实际值计算偏差, 可知: 以物探 2 号线为例, 高密度电法与三维激光扫描的溶洞范围平面位置不一致, 偏差在 18 m 左右(三维激光模型的结果超过电法解译范围为负值), 深度

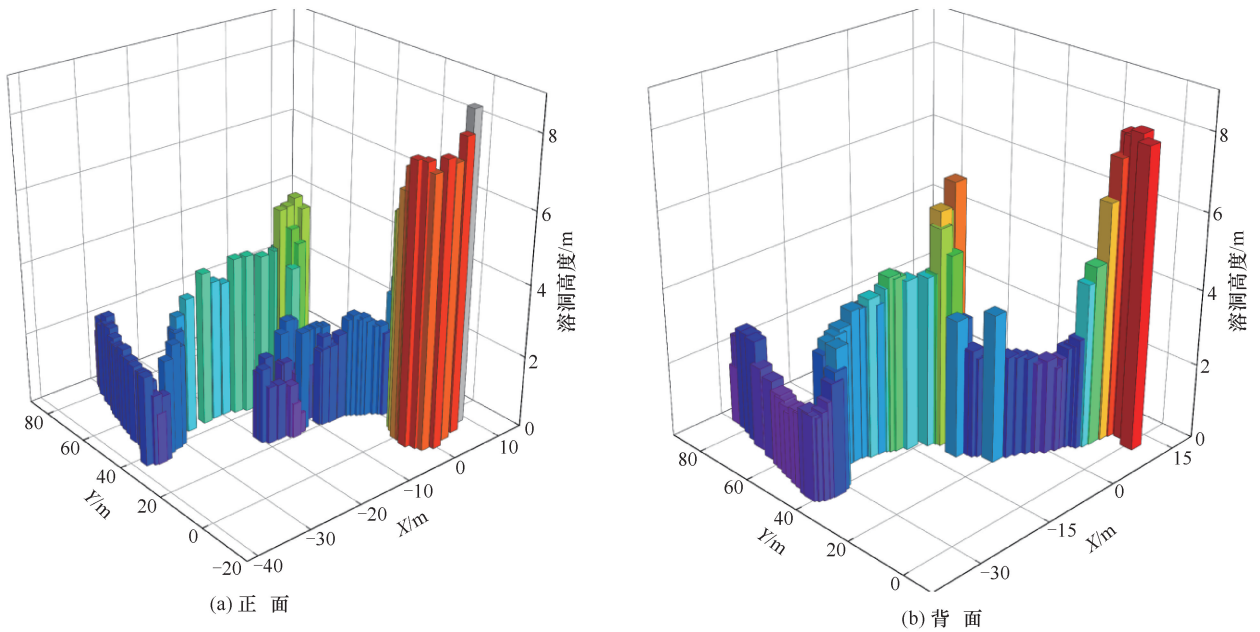


图 10 溶洞高度三维图

Fig. 10 Three-dimensional view of the height of the cave

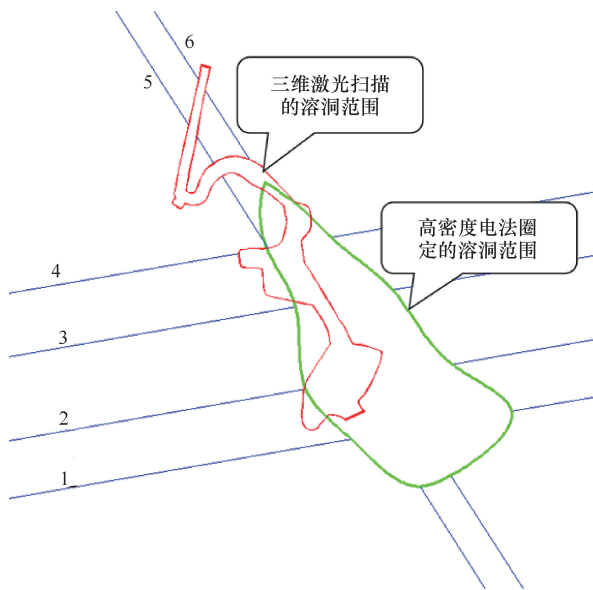


图 11 高密度电法解释结果和三维激光模型结果平面

Fig. 11 High-density electrical interpretation results and 3D laser model results plan

方向的埋深偏差 10 m 左右, 溶洞高度偏差在 2 m。另外几条线如表 2 所列。

结合以往学者对偏差率的研究<sup>[39]</sup>, 将偏差率表示为实际值与理想值的差值和理想值的比, 再根据表 2 对比分析结果, 得到高密度电法和三维激光技术在探测溶洞时的偏差: 平面偏差最小为 0 m, 最大为 18 m, 偏差率在 0%~112.5%, 深度方向最小偏差为 2 m, 最大偏差为 10 m, 偏差率在 8%~33.3%。

表 2 比对分析结果

Table 2 Comparative analysis results

物探线号	平面偏差/m	埋深偏差/m	高度偏差/m
2 线	0 ~ 18	10	2
3 线	3.5 ~ 15	9	8
4 线	-6 ~ 7	2	4
5 线	-15 ~ 0	3	4
6 线	-6.5 ~ 0	3	7

通过上述分析, 利用高密度电法和三维激光扫描技术, 对溶洞进行定性与定量综合分析, 可揭示溶洞在平面和空间上的变化情况。在平面上, 高密度电法提供了溶洞的走向及平面展布范围的基本信息。运用高密度电法探测并对其数据进行处理, 可以确定溶洞的分布趋势、主要走向以及可能存在的局部区域。再通过三维激光扫描技术对溶洞内部进行精细化探测, 可以获取其在立体空间中的详细形态和结构信息, 以高精度、高密度的方式确定溶洞内部的空间数据, 包括洞穴形状、大小、高度、倾斜程度等参数, 从而实现溶洞的立体呈现。

## 4 结果讨论

贵州岩溶区发育强烈、地下水条件也比较复杂, 在施工中物探技术是探明岩溶发育的有效手段, 能够定位绝大部分的溶洞, 但是物探解译结果只能通过二维剖面表达, 且存在多解性, 无法准确探明溶洞的发展空间展布, 通常需要结合钻探、三维激光扫描等手

段。而利用钻探需要大量的钻孔,且结果仅具有“一孔之见”,无法对整个区域溶洞的发展进行连续表达。本文通过高密度电法结合三维激光扫描的探测方法,从定性分析到定量分析,能有效地探明溶洞发展,并且将高密度电法与三维激光扫描结果进行比对分析,进一步确定高密度电法探测溶洞解译的偏差率,目的是用于标识不能进入的溶洞范围,能更好地为工程施工中利用高密度电法探明溶洞提供参考。将该方法应用在输电线路塔基岩溶探测中<sup>[26]</sup>,实现溶洞可视化,精确查明了塔位岩溶空间的分布信息。存在三维激光扫描受到遮挡导致无法全面扫描溶洞、高密度电法探测的局限性等问题,且本文方法只涉及到高密度电法以及三维激光扫描,今后可以利用其他物探技术与三维激光扫描结合,能更精确的探测不同地质环境的溶洞发育情况。

## 5 结论

本文将高密度电法结合三维激光扫描应用于遵义市地矿某小区中,对地基下的复杂溶洞进行精细化探测,得出以下结论。

(1)高密度电法反演结果可圈定研究区地下溶洞发育范围,通过视电阻率反演结果发现该区存在大型溶洞,溶洞发育宽度在12~78 m范围,影响深度在19~40 m范围,整体走势呈NNW-SSE向;再通过三维激光扫描,分析空间展布情况,可知溶洞总体积为2 795.48 m<sup>3</sup>,其中溶洞最小埋深6 m,最大埋深31.64 m,溶洞薄处高度仅2 m,最大高度6~8 m,最小宽度4 m,最大宽度达23 m,整体呈不规则条带状展布。

(2)对比高密度电法与三维激光扫描技术的探测结果,可以得到二者相结合探测偏差率在水平向处于0%~112.5%,竖向探测最小偏差为2 m,最大偏差为10 m,偏差率在8%~33.3%,相对较小。通过偏差率可以提高地质勘探的效率和准确性,为其他类似工程提供参考。

综合这种从定性分析到定量分析的综合探测方法,能够有效识别溶洞风险。但是也存在不足:高密度电法探测结果准确性受地形起伏影响,应在选择平坦的地方布置测线,利于探测;另外对于较深的溶洞,超出其有效探测深度范围,无法获取准确的信息,容易遗漏深部溶洞的存在;三维激光扫描在溶洞内探测时,激光扫描结果的精度会受到扫描距离的影响,以及溶腔内存在一些狭窄、弯曲或者凹陷的部位可能无法被激光完全覆盖,从而无法获得这些区域的

准确信息,导致扫描结果的不完整性,此时应该结合其他物探手段进行综合解译。

## 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 Datong, LUO Yan. Measurement of carbonate rock distribution area in China [J]. Karst in China, 1983(2): 61-64.
- [2] SU M, ZHAO Y, XUE Y, et al. Progressive fine integrated geophysical method for karst detection during subway construction [J]. Pure and Applied Geophysics, 2021, 178: 2-4.
- [3] 代玲玲,江勇. 综合物探技术在煤矿采空区探测应用实践分析[J]. 煤炭技术, 2024, 43(3): 115-119.  
DAI Lingling, JIANG Yong. Practical analysis of the application of comprehensive geophysical prospecting technology in coal mine goaf detection [J]. Coal Technology, 2024, 43(3): 115-119.
- [4] 何俊飞. 综合物探在新兴都斛铜矿床勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 375-381.  
HE Junfei. Application of comprehensive geophysical prospecting in the exploration of copper deposits in Xinxing Duhu [J]. Geophysical and Geochemical Prospecting, 2024, 48(2): 375-381.
- [5] 李谭伟,李振兴,葛延明,等. 综合物探方法在株洲湘江大桥勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 785-792.  
LI Tanwei, LI Zhenxing, GE Yanming, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in the investigation of Xiangjiang Bridge in Zhuzhou [J]. Geophysical and Geochemical Prospecting, 2021, 45(3): 785-792.
- [6] 李鑫. 综合物探方法在文物保护工作中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
LI Xin. Application of integrated geophysical prospecting method in cultural relics conservation [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [7] 李英宾,张伟,李江坤. 综合物探方法在伊犁盆地采空区探测中的应用[J]. 地质论评, 2024, 70(S1): 131-132.  
LI Yingbin, ZHANG Wei, LI Jiangkun. Application of comprehensive geophysical prospecting method in goaf detection in Yili Basin [J]. Geological Review. 2024, 70(S1): 131-132.
- [8] 彭军,高建华,熊友亮,等. 综合物探在贵州胜土水库岩溶调查中的应用[J]. 勘察科学技术, 2022(1): 61-64.  
PENG Jun, GAO Jianhua, XIONG Youliang, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting in karst investigation of Shengtou Reservoir in Guizhou Province [J]. Survey Science and Technology, 2022(1): 61-64.
- [9] 余凯. 综合物探法在铁路基底岩溶探测的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
YU Kai. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Karst Detection of Railway Substrate [D]. Chengdu:

- Chengdu University of Technology, 2016.
- [10] 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.
- ZHANG Jian, FENG Xuliang, YUE Xiangping. Application of comprehensive geophysical prospecting method in hidden karst detection [J]. Geophysical and Geochemical Prospecting, 2022, 46(6): 1403-1410.
- [11] 朱国先, 周兵, 陈勇. 综合物探法在城市道路塌陷病害中的应用[J]. 城市勘测, 2023(S1): 106-109.
- ZHU Guoxian, ZHOU Bing, CHEN Yong. Application of comprehensive geophysical prospecting method in urban road collapse disease [J]. Urban Survey, 2021 (S1): 106-109.
- [12] 徐佳林. 基于瞬变电磁法的城市隐伏地质灾害快速探测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- XU Jialin. Research on rapid detection method of urban latent geological hazards based on transient electromagnetic method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [13] 王丽红. 高密度电法和瞬变电磁法在煤矿采空区的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- WANG Lihong. Application of High-density Electrical Eethod and Transient Electromagnetic Method in Coal Mine Goaf [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [14] FAN J, HOU E, JIN D, et al. Application of opposing coils transient electromagnetic method in urban area with metal interference [J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 228: 105467.
- [15] LIU D, LIU M, SUN H. et al. Detection and comprehensive treatment for giant karst caves under the tunnel floor: A case study in Guangxi, China[J]. Environ Earth Sciences. 2024, 83.
- [16] 于江龙, 周星志. 高密度电法与地质雷达在岩溶勘察的综合应用[J]. 红水河, 2022, 41(1): 108-113.
- YU Jianglong, ZHOU Xingzhi. Comprehensive application of high-density electrical method and geological radar in karst survey[J]. Red Water River, 2022, 41(1): 108-113.
- [17] ZHANG L, ZHANG S, DENG Z, et al. Geological detection of hard rocks by GPR and signal time-frequency characteristics analysis in urban underground trenchless construction[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(4): 045406.
- [18] HUANG S, LIN J, HUANG Q, et al. An emerging method using electromagnetic wave computed tomography for the detection of karst caves[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(3): 2713-2723.
- [19] XIE P, LI J, WANG B, et al. Application of SPAC method and electromagnetic wave CT in karst detection of Wuhan Metro Line 8 [J]. Geodesy and Geodynamics. 2023, 14(5): 513-520.
- [20] 杨力. 高密度电法和地震映像法在岩溶勘察中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- YANG Li. Application of High-density Electric Method and Seismic Imaging Method in Karst Investigation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [21] 沈旺. 高密度电法在岩溶勘察中的应用[J]. 江西建材, 2023(8): 198-199.
- SHEN Wang. Application of high-density electric method in karst exploration [J]. Jiangxi Building Materials, 2023(8): 198-199.
- [22] 史玉林. 高密度电法勘测技术在采空区探测中的应用[J]. 采矿技术, 2024, 24(1): 107-110.
- SHI Yulin. Application of high-density electrical survey technology in goaf detection [J]. Mining Technology, 2024, 24(1): 107-110.
- [23] 王浩, 王永刚, 张俊. 高密度电法在供电所地基塌陷沉降检测中的应用[J]. 水科学与工程技术, 2024(1): 81-85.
- WANG Hao, WANG Yonggang, ZHANG Jun. Application of high-density electrical method in the detection of foundation collapse and settlement of power supply station [J]. Water Science and Engineering Technology, 2024 (1): 81-85.
- [24] 熊友亮, 余修毕, 李欢, 等. 高密度电法与音频大地电磁法在工程勘察中的应用[J]. 四川建材, 2024, 50(2): 42-44.
- XIONG Youliang, YU Xiubi, LI Huan, et al. Application of high-density electrical and audio magnetotelluric method in engineering investigation [J]. Sichuan Building Materials, 2024, 50(2): 42-44.
- [25] 杨芳, 刘洪. 高密度电法勘探在工程勘察中的应用[J]. 科技创新导报, 2018, 15(34): 7-8.
- YANG Fang, LIU Hong. Application of high-density electrical exploration in engineering investigation [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(34): 7-8.
- [26] XI J, CUI D. Research on comprehensive exploration technology of underground soil karst cave [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 660(1): 012012.
- [27] LIU Y, CHEN T T, QIAO Y Q, et al. Optical design and analysis of a high-speed triple galvanometer laser 3D scanning system [J]. Optics and Laser Technology, 2025, 181: 111608.
- [28] KONG L, MA L, WANG K, et al. Three-dimensional-scanning of pipe inner walls based on line laser [J]. Sensors, 2024, 24: 3554.
- [29] 丁朋, 楼加丁, 杨新明, 等. 一种地下空洞三维激光扫描仪的设计与应用[J]. 陕西水利, 2019(10): 1-3.
- DING Peng, LOU Jiading, YANG Xinming. Design and application of a 3D laser scanner for underground cavities [J]. Shaanxi Water Conservancy, 2019 (10): 1-3.
- [30] 冯正茂, 杨世金, 黄杰品, 等. 三维激光扫描技术在喀斯特洞穴测绘中的应用[J]. 地矿测绘, 2021, 37(3): 30-33.
- FENG Zhengmao, YANG Shijin, HUANG Jiepin, et al. Application of 3D laser scanning technology in karst cave surveying and mapping [J]. Geology and Mineral Surveying and Mapping, 2021, 37(3): 30-33.
- [31] 李红梅, 向荣荣, 刘铭扬, 等. 三维激光扫描技术在公路溶洞洞

- 量中的应用[J]. 路基工程, 2021(4): 42-45.
- LI Hongmei, XIANG Rongrong, LIU Mingyang, et al. Application of 3D laser scanning technology in highway karst cave measurement [J]. Subgrade Engineering, 2021(4): 42-45.
- [32] 聂品. 移动式三维激光扫描技术在公路隧道溶洞测量中的应用[J]. 西部交通科技, 2022(6): 125-126.
- NIE Pin. Application of mobile 3D laser scanning technology in karst cave measurement of highway tunnels [J]. Western Transportation Science and Technology, 2022(6): 125-126.
- [33] 王福全, 王立杰, 王社光, 等. 三维电法及激光扫描技术在矿房空区探测中的应用[J]. 现代矿业, 2022, 38(4): 50-53.
- WANG Fuquan, WANG Lijie, WANG Sheguang, et al. Application of 3D electrical method and laser scanning technology in mine empty area detection [J]. Modern Mining, 2022, 38(4): 50-53.
- [34] 刘永, 王永刚, 杨建华, 等. 三维激光扫描技术在塔基岩溶精细化探测中的应用[J]. 红水河, 2023, 42(3): 109-113.
- LIU Yong, WANG Yonggang, YANG Jianhua, et al. Application of 3D laser scanning technology in fine detection of karst in tower base [J]. Hongshuihe, 2023, 42(3): 109-113.
- [35] 王永刚, 易贤龙. 高密度电法与3D溶洞激光扫描在输电线路塔基岩溶探测中的应用效果分析[J]. 城市地质, 2023, 18(3): 89-95.
- WANG Yonggang, YI Xianlong. Analysis of the application effect of high-density electric method and 3D karst cave laser scanning in karst detection of transmission line tower foundation [J]. Urban Geology, 2023, 18(3): 89-95.
- [36] WANG J, LI L P, SHI S S, et al. Fine exploration and control of subway crossing karst area[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2588.
- [37] SUN S, LI L, WANG J, et al. Reconstruction and measurement of irregular karst caves using blst along the shield metro line [J]. Applied Sciences. 2020, 10(1): 392.
- [38] BA X, LI L, WANG J, et al. Near-surface site investigation and imaging of karst cave using comprehensive geophysical and laser scanning: a case study in Shandong, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(12): 298.
- [39] 李博, 刘志其, 孙昭, 等. 基于离散率及偏差率的光伏电站运维管理实践[J]. 装备维修技术, 2024(2): 73-76.
- LI Bo, LIU Zhiqi, SUN Zhao et al. O&M management practice of photovoltaic power station based on dispersion rate and deviation rate [J]. Equipment Maintenance Technology, 2024(2): 73-76.

(责任编辑 王海锋)