

覃瑞东, 孙冠军, 鲁 恺, 等. 基于井间无线电波成像的岩溶发育特征研究——以滇中引水工程积福村渡槽岩溶区探查为例[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 657-668.

DOI: 10.11932/karst20250312

基于井间无线电波成像的岩溶发育特征研究 ——以滇中引水工程积福村渡槽岩溶区探查为例

覃瑞东¹, 孙冠军¹, 鲁 恺², 史存鹏¹, 鹿明轩¹, 李 伟¹, 杜理选¹

(1. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 西安科技大学

地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 滇中引水工程积福村渡槽线路区地下岩溶发育, 可能引起地基变形失稳、桩基坑壁渗涌水等工程地质问题, 查明渡槽部位的岩溶发育特征意义重大。采用井间无线电波成像技术探测地下岩溶发育状况, 使用联合迭代法反演得到地下介质的电磁波吸收系数, 并统计解译溶洞的空间分布、形态及连通性等规律。井间无线电波成像结果精细反映了地下岩溶的位置及形态、岩体完整性等重要地质信息, 其所揭示的岩溶异常范围与钻探取心及钻孔全景数字成像结果高度一致。研究表明井间无线电波成像是一种有效的岩溶探测方法, 能够直观地反映地下岩溶的发育特征及影响范围, 从而为渡槽工程的建设提供科学的参考依据。

关键词: 井间无线电波成像; 岩溶探测; 岩溶发育特征; 滇中引水工程

创新点: 井间无线电波成像能有效探测地下岩溶, 对成像结果中的异常区进行统计分析可直观获取地下岩溶的总体发育特征, 为渡槽工程的建设提供科学依据。

中图分类号: P631.3; P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0657-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

岩溶是指地表和地下水对可溶性岩石进行的以化学溶解为主, 并伴随物理冲蚀和重力崩塌、物质转移和再沉积的综合地质作用, 以及由此形成的各种特殊地貌及水文现象的总称^[1]。中国西南地区岩溶广泛分布且发育类型多样, 在该地区的工程建设将不可避免地面面临岩溶塌陷、地基变形破坏、隧洞涌水突泥和水库渗漏等工程地质问题^[2-4]。因此, 查明工程区内岩溶的空间分布和发育特征, 并在此基础上采取科学的岩溶治理措施, 对确保工程的安全施工和正常运行具有重要作用^[5-6]。

地球物理探测具有勘探成本低、效率高等特点,

探测成果可反映地下岩溶空间位置、连通情况及发育规模等重要信息, 有效补充了钻探结果的空间连续性不足, 因而成为地下岩溶探测的重要技术手段^[7]。地下岩溶探测常用的地球物理方法包括井间无线电波成像、弹性波层析成像、地震波反射法、高密度电阻率法、探地雷达、大地电磁法、瞬变电磁法、微动探测法等^[8-16]。井间无线电波成像受场地条件限制小, 探测精度高, 常用于井间或坑道间的溶洞、断层、破碎带、采空区等异常区域探测, 其成像结果直观展示了介质对电磁波的吸收强弱程度, 在工程勘察领域得到了广泛的应用^[17-18]。

本文以滇中引水工程积福村渡槽岩溶区探查为例, 综合考虑场地条件、外界干扰因素、探测深度及

第一作者简介: 覃瑞东(1992—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程地球物理探测方法与应用研究。E-mail: qinruidong@outlook.com。

收稿日期: 2024-10-03

精度等限制和要求,采用井间无线电波成像进行地下岩溶精细探测,并对成像结果进行解译和统计,在此基础上综合分析研究区内岩溶分布特征、形态特征、连通特性等,从而得出积福村渡槽线路区岩溶的总体发育规律。

1 研究区概况

积福村渡槽位于云南省大理白族自治州鹤庆县松桂镇(图 1a),是滇中引水工程大理 I 段输水干渠的重要组成部分。积福村渡槽连接香炉山隧洞出口和积福村隧洞进口,长度为 595 m(里程 DL1062+596 m~DL1063+191 m),采用双线 U 形设计,设计流量为 $135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,渡槽共布置 18 个槽墩(台),主体建筑物属 I 级^[19-21]。

渡槽线路区及周边分布地层岩性特征见表 1,第四系覆盖层主要位于情人谷、松桂大沟及部分槽谷斜坡内,其中冲洪积层主要分布于情人谷沟槽和下游松桂大沟内,残坡积层主要分布于南北情人谷之

间的山丘平台及两侧。基岩在区域内出露较广泛,其中松桂组分布于渡槽两端香炉山隧洞出口和积福村隧洞进口斜坡部位,渡槽所在区域未见出露;中窝组广泛分布于线路区及两侧,在地表仅于局部较陡斜坡脚出露,一般下伏于第四系覆盖层或松桂组之下数米至 20 m(图 1b)。

根据已有地质资料,研究区内的可溶岩地层为三叠系上统中窝组(T_3z)灰岩夹泥质灰岩(图 2),地表岩溶形态主要为溶蚀沟槽与小规模落水洞,地下岩溶形态主要为溶洞、溶缝和溶隙,溶(缝)隙多为黏土夹碎(块)石的半充填或全充填。研究区域可分为四个岩溶区,即北侧冲沟溶蚀风化深槽区(0~2 墩)、北侧冲沟溶蚀风化宽缓区(3~7 墩)、中部略缓山梁溶蚀风化区(8~14 墩)及南侧冲沟溶蚀风化深槽区(15~17 墩)。

由于物性分布不均、岩性及完整性存在差异,不同地下介质对电磁波的吸收程度各不相同(表 2)。在渡槽线路范围内,第四系覆盖层表现为高吸收系数,完整灰岩的吸收系数较小;而裂隙、岩溶发育时,

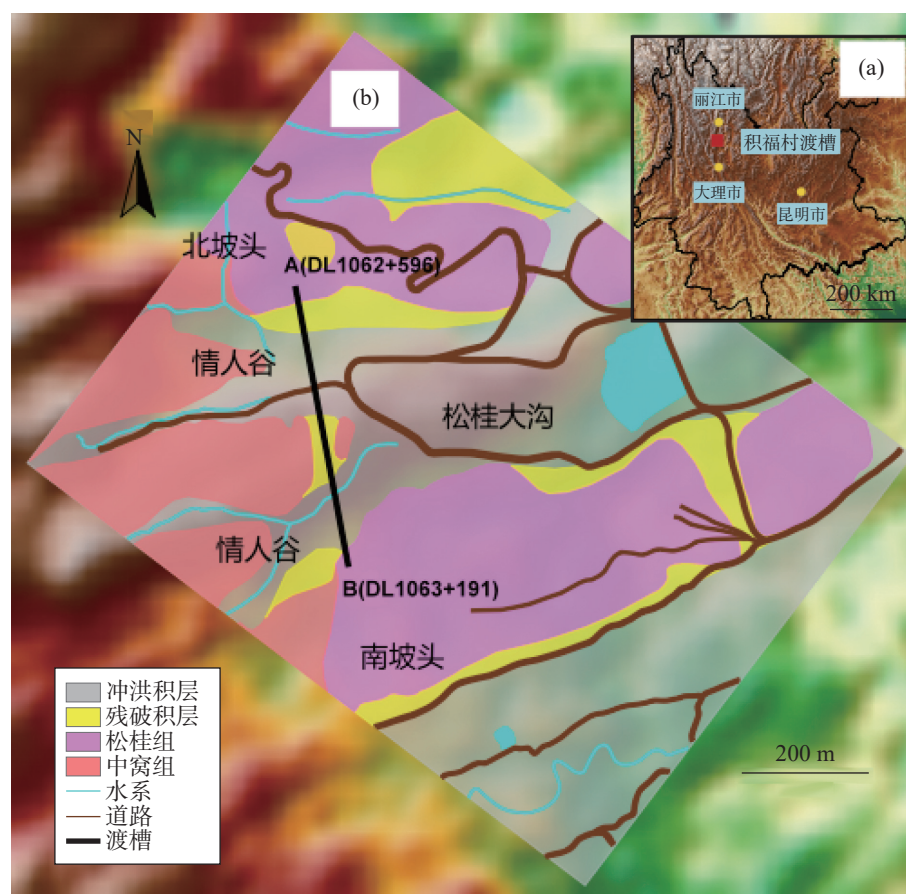


图 1 研究区位置与地层示意图

Fig. 1 Location and geology of the study area

表 1 研究区地层岩性
Table 1 Stratum lithology of the study area

界	系	组	代号	厚度/m	岩性特征
新生界	第四系	冲洪积层	Q^{pal}	9~32	浅棕红色、黄褐色、黑褐色黏土与含砾黏土
		残坡积层	Q^{edl}	4~20	浅棕红色、黄褐色粉质黏土
中生界	三叠系	松桂组	T_{3sg}	>10	灰、灰褐色泥岩,灰黑色砂岩,泥岩夹黑色含炭质泥岩或页岩
		中窝组	T_{3z}	200~300	灰色、深灰色中厚层灰岩夹褐灰色泥质灰岩

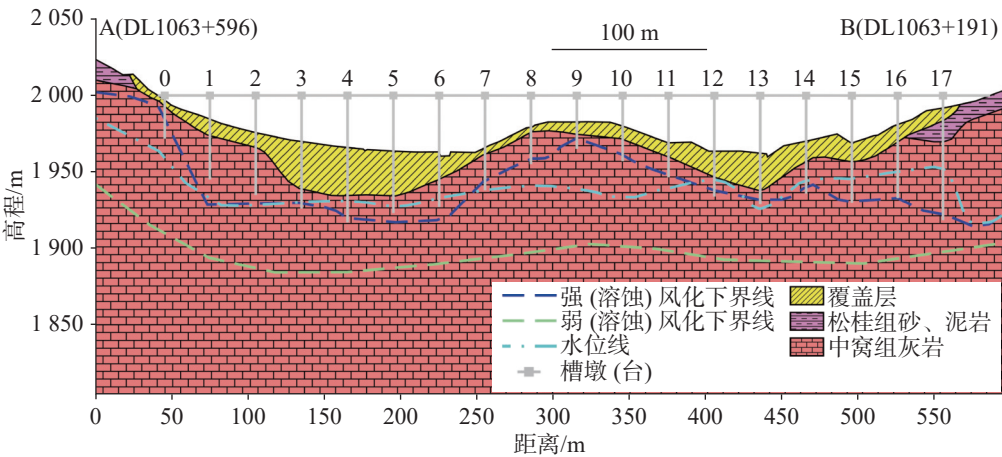


图 2 渡槽线路区地质剖面图
Fig. 2 Geological section of the aqueduct route area

表 2 常见介质理论吸收系数^[22]
Table 2 Theoretical absorption coefficient of common medium^[22]

介质	电阻率/ $\Omega\cdot m$	相对介电常数	吸收系数/ $dB\cdot m^{-1}$		
			12 MHz	20 MHz	28 MHz
水	0.1~100	80	1.82~188.55	1.83~242.99	1.83~286.99
黏土	1~10	32	17.00~59.15	20.50~75.82	22.72~89.08
灰岩	100~10000	15	0.04~3.85	0.04~4.06	0.04~4.13

特别是当裂隙、溶洞充填水和黏土等物质时,会使基岩的吸收系数增大、电磁波能量发生明显衰减,从而形成高吸收异常区域。因此在渡槽线路区内应用井间无线电波成像技术进行岩溶探测具有良好的地球物理条件^[23]。

2 方法原理

根据电磁波传播理论,电磁波在有耗介质空间传播的过程中,会发生透射、反射、折射及绕射现象,且电磁波的能量由于介质的吸收而发生衰减。井间无线电波成像是基于直线追踪的衰减层析成像,发射端采用半波偶极天线发射一定频率(0.1~35.0 MHz)的电磁波,并在远场区使用鞭状天线接收。

对于常用的半波偶极天线,其接收端电磁波电场强度 E 与发射端电磁波初始电场强度 E_0 的关系为:

$$E = E_0 \frac{\exp(-\beta r)}{r} f(\theta)$$
 (1)

式中: β 为介质电磁波吸收系数($dB\cdot m^{-1}$); r 为发射与接收天线距离(m); θ 为接收天线与电场方向的夹角; f 为半波偶极天线方向因子,在均匀介质中通常表示为:

$$f(\theta) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)$$
 (2)

介质电磁波吸收系数 β 的大小与多种因素有关,其表达式为:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right]}$$
 (3)

式中: ω 为角频率($rad\cdot s^{-1}$); μ 为磁导率($H\cdot m^{-1}$); ε 为

介电常数($F \cdot m^{-1}$); σ 为电导率($S \cdot m^{-1}$)。因此,如图3所示,通过一定的观测系统,当一定频率的电磁波穿过吸收系数 β 不均匀的地下介质时,可观测到电磁场分布所产生的变化,从而获取地下介质的空间分布及物理性质等信息^[24-26]。

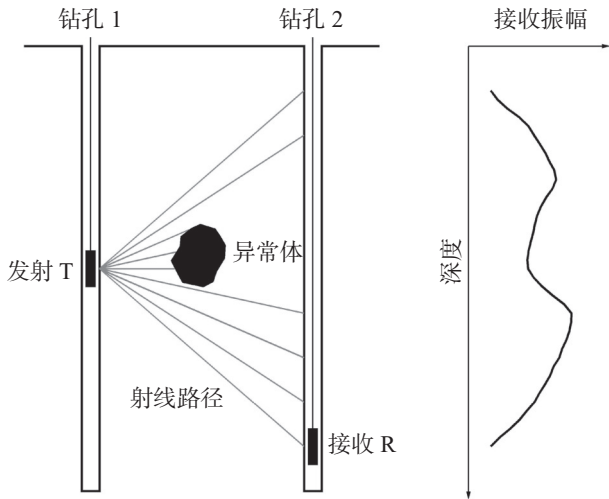


图3 井间无线电波成像异常示意图

Fig. 3 Abnormal data of RIM

井间无线电波成像野外数据观测常采用定点观测(定点发射或定点接收)与同步观测两种方式。同步观测能够快速了解钻孔间剖面情况,常用于初步确定异常分布位置。定点发射装置灵活方便,能准确反映地下异常体的位置、形态及规模信息,是井间无线电波成像最主要的观测方式。

井间无线电波成像数据反演是将钻孔间的剖面网格化,每个网格内的介质视为均匀介质,采用一定的射线模型建立吸收系数初始模型,根据正演电场强度与实测电场强度的差值,经过图像重建算法(如

代数重建法,联合迭代法,最小平方正交分解法等),最终得到如图4所示钻孔间介质的吸收系数分布图^[27-28]。

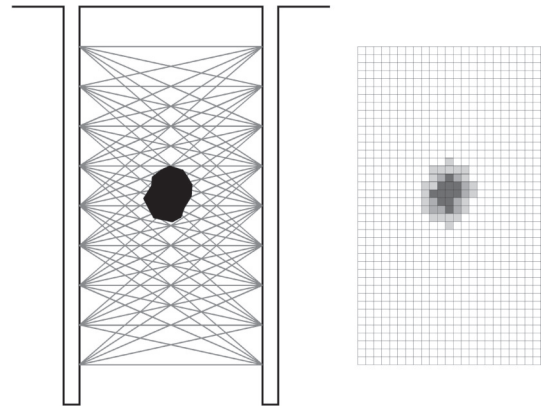


图4 井间无线电波成像观测系统及成像结果示意图

Fig. 4 Geometry and imaging results of RIM

3 成像结果

3.1 数据观测

积福村渡槽岩溶区探查需结合钻探及井间无线电波成像结果,探查0~17号槽墩桩基位置的岩溶发育情况,各槽墩的桩基及井间无线电波成像剖面布置如图5所示,本次共布置井间无线电波成像剖面124条,孔间距为7.9~12.3 m。

数据采集使用湖南奥成科技有限公司生产的HX-JDT-03A井间无线电波透视仪,采用发射机固定、接收机上下移动的观测方式。采集参数由野外试验确定,以满足井间无线电波成像探测距离、分辨精度及数据质量的要求。发射与接收采样间距皆为

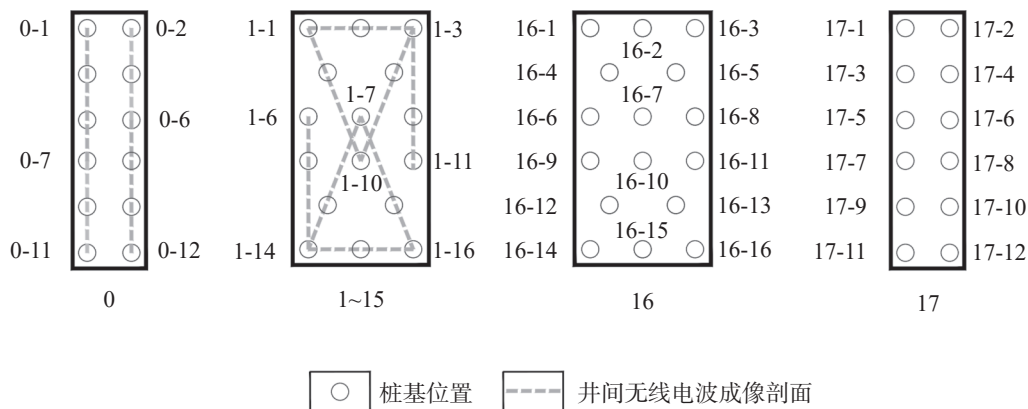


图5 井间无线电波成像剖面布置图

Fig. 5 Layout of boreholes and RIM sections

1.0 m, 天线频率采用 12 MHz、20 MHz 和 28 MHz 三种, 电磁波发射-接收路径与水平夹角小于 45°。

由于观测仪器的稳定性、深度误差以及外界随机干扰等因素可能对观测结果产生干扰, 因此需在数据采集时选取一部分孔段进行重复观测。观测数据质量常以重复两次观测数据的均方误差进行评价:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (D_i - D'_i)^2}$$

(4)

式中: ε 为测量电场强度总均方误差; D_i 和 D'_i 分别表示原始和重复观测电场强度数据; N 为重复观测点数量。如图 6 所示, 剖面 6-7~6-14 中重复观测曲线的 3 种发射频率得到的两次观测数据基本重合。由 (4) 式计算得到所有重复观测数据的均方误差 ε 为 ± 1.52 dB。根据表 3 中评价标准, 此次观测数据质量等级为 I 级。

3.2 原始数据分析

井间无线电波成像原始记录曲线直接反映了电磁波在穿过“发射-接收”路径时的能量衰减程度, 其

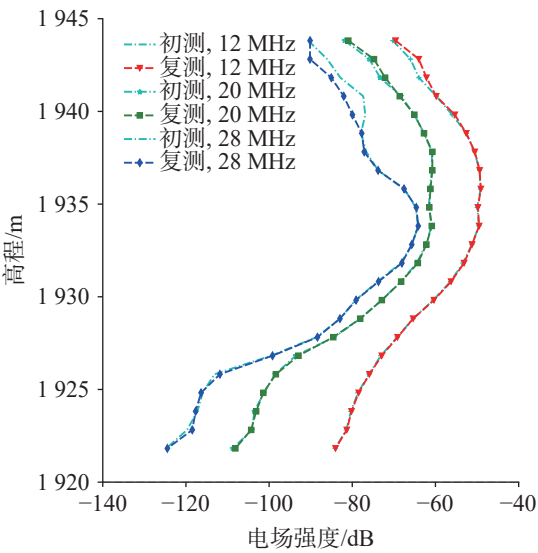


图 6 剖面 6-7~6-14 重复观测数据曲线
Fig. 6 Data for repeated observations of Sections 6-7 to 6-14

表 3 观测数据质量评价标准^[29]

Table 3 Evaluation criteria of observed data quality ^[29]		
级别	均方误差 ε /dB	曲线形态
I	± 5	重复性良好
II	± 8	重复性良好
III	± 10	重复性良好

形态变化异常点可初步判断岩溶或岩体破碎区域的范围及发育程度。图 7a 为 2-1~2-10 剖面发射天线在孔深 40 m 处, 接收天线移动观测所获得的电场强度曲线。根据曲线形态变化, 可得到 a1 至 a5 共 5 处异常点, 其中 a1 异常点可能为测量误差, a2 至 a5 异常点在 3 种频率下的深度基本一致, 推测存在 I、II 两处高吸收异常区域。

由剖面全部观测数据可提取出(近)水平同步观测电场强度曲线, 其曲线形态可初步反映地下岩溶发育位置及岩体完整性。图 7(b)中为 2-1~2-10 剖面提取的(近)水平同步观测曲线, 根据 3 种频率下的曲线形态, 可得 a6~a15 共 10 处异常点, 部分异常点在 3 种频率下较好吻合(如 a8、a13)。根据上述异常点可进一步划分出 4 个存在高吸收异常的深度区间(灰色区域), 其中: 高程 1961.28 m 处推断为全风化下界线位置, 与钻探所揭示全风化下界线高程接近(ZK2-1 为 1963.28 m, ZK2-10 为 1960.81 m); 高程 1947.28~1953.28 m 为高吸收异常段, 推测该段存在岩溶发育; 高程 1941.28~1944.28 m 段存在吸收异常, 但异常幅度较小, 且与图 7a 中吸收异常区 II 相符, 推测该段岩溶发育; 高程 1927.28~1931.28 m 为高吸收异常段, 该异常与图 7(a)中吸收异常区 I 高度吻合, 推测该段存在岩溶发育。

3.3 成像结果分析

对原始观测数据进行观测系统参数复核、数据坏点剔除等数据预处理工作后, 使用联合迭代法对两孔间介质的电磁波吸收系数 β 进行图像重建。

图 8 为 2-1~2-10 剖面 28 MHz 的成像结果。覆盖层及全风化层为高吸收区域, 推测 $7.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 等值线为全风化下界线, 与 ZKT2-10 钻孔揭露全风化下界线较吻合; 而推测的全风化下界线与 ZKT2-1 钻孔揭露全风化下界线存在差异, 应是 ZKT2-1 钻孔内岩溶发育位置充填泥质引起。高程 1950.86~1953.64 m 段为高吸收异常区域, 吸收系数大于 $4.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 的异常区域形态为水平条带状, 推测为岩溶发育, 钻孔全景数字成像显示该段为溶洞(图 9a), 与钻孔岩心揭露溶洞高程(图 9d)高度一致。高程 1942.88~1947.65 m 段吸收系数大于 $4.0 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 的条带状区域, 其异常幅度较上一溶洞区域偏小, 因此推测该区域为有小溶洞发育的岩体溶蚀破碎带, 钻孔全景数字成像显示该段为溶蚀裂隙发育(图 9b), 与钻孔岩心揭示

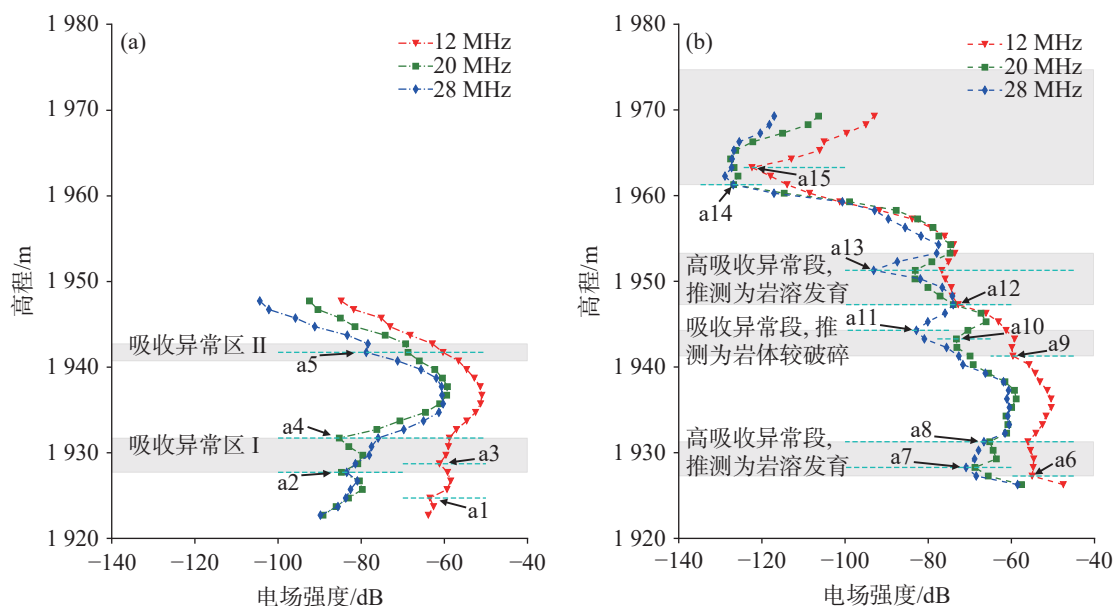


图 7 剖面 2-1~2-10 井间无线电波成像原始观测数据:(a)发射位于孔深 40 m 处观测曲线;(b)(近)水平同步观测曲线.

Fig. 7 RIM data of Sections 2-1 to 2-10: (a) curves of cross-hole observation at the depth of 40 m;

(b) curves of (quasi) horizontal synchronous observation

(图 9e)的溶洞相符。高程 1927.44~1930.32 m 段存在条带状异常区域,其吸收系数大于 $3.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,明显高于周围背景值,推测为岩溶发育,钻孔全景数字成像显示该段为溶洞(图 9c),与钻孔岩心所揭示(图 9f)的溶洞一致。此外,高程 1941.00 m 处 $3.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 等值线下侧背景值整体小于上侧,推测 $3.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 等值线为强风化下界线。综合分析水平同步观测曲线与吸收系数成像成果图,可知图 7(b)中根据水平同步观测曲线划分的异常区域与图 8 中的高吸收异常区高程范围高度一致。

因此,由水平同步观测曲线可用于快速了解地下异常体分布的深度范围信息,井间无线电波成像成果图则可进一步定量判别异常体边界、形态及吸收系数,从而得到地下岩溶发育形态及强烈程度、岩体破碎带范围及破碎程度等重要地质信息。

4 岩溶发育特征分析

基于积福村渡槽 0~15 号槽墩的井间无线电波成像岩溶探测成果及钻探取心成果,对研究区域的岩溶发育特征进行分析。由于电磁波吸收系数受多重因素影响,其值大小为相对值,故本文在综合对比 3 种频率下的成像结果与钻探取心结果后,选择二者对应最佳的井间无线电波成像结果进行解译,并对解译结果进行统计分析。井间无线电波成像结果展

示了岩溶的空间分布,岩溶大小、形状以及溶洞的组合形态、连通状况等,直观精细地反映了地下岩溶、破碎带及其它地质现象的发育特征。

4.1 岩溶分布

渡槽线路区 0~15 号槽墩,井间无线电波成像解译出溶洞 517 个、钻孔揭露溶洞(缝)470 个,其溶洞位置分布(投影至渡槽轴线)如图 10 所示。为与井间无线电波成像结果区分,钻孔岩心揭露溶洞发育位置横坐标整体左移 5 m。图 10 顶部和右侧分别为溶洞数量(个)沿里程和高程分布的统计直方图。由统计结果可知,井间无线电波成像探测结果与钻探结果的岩溶分布规律总体吻合。沿渡槽轴线方向,1~2 号槽墩和 15 号槽墩的岩溶数量整体高于 3~14 号槽墩,岩溶总体发育呈两端强溶蚀风化,中间溶蚀风化略弱的特征。沿高程统计,高程 1915 m~1955 m 段岩溶发育数量明显高于其它位置,总体表现为强溶蚀风化带内岩溶整体发育强烈。

4.2 岩溶形态

单个溶洞的垂直厚度统计直方图如图 11 所示,钻探揭露溶洞大小主要分布在 0~2.6 m 之间,其中 0~0.6 m 溶洞约占 42%,井间无线电波成像解译溶洞大小集中于 0.4~3.0 m(约占 80%),由于受井间无线

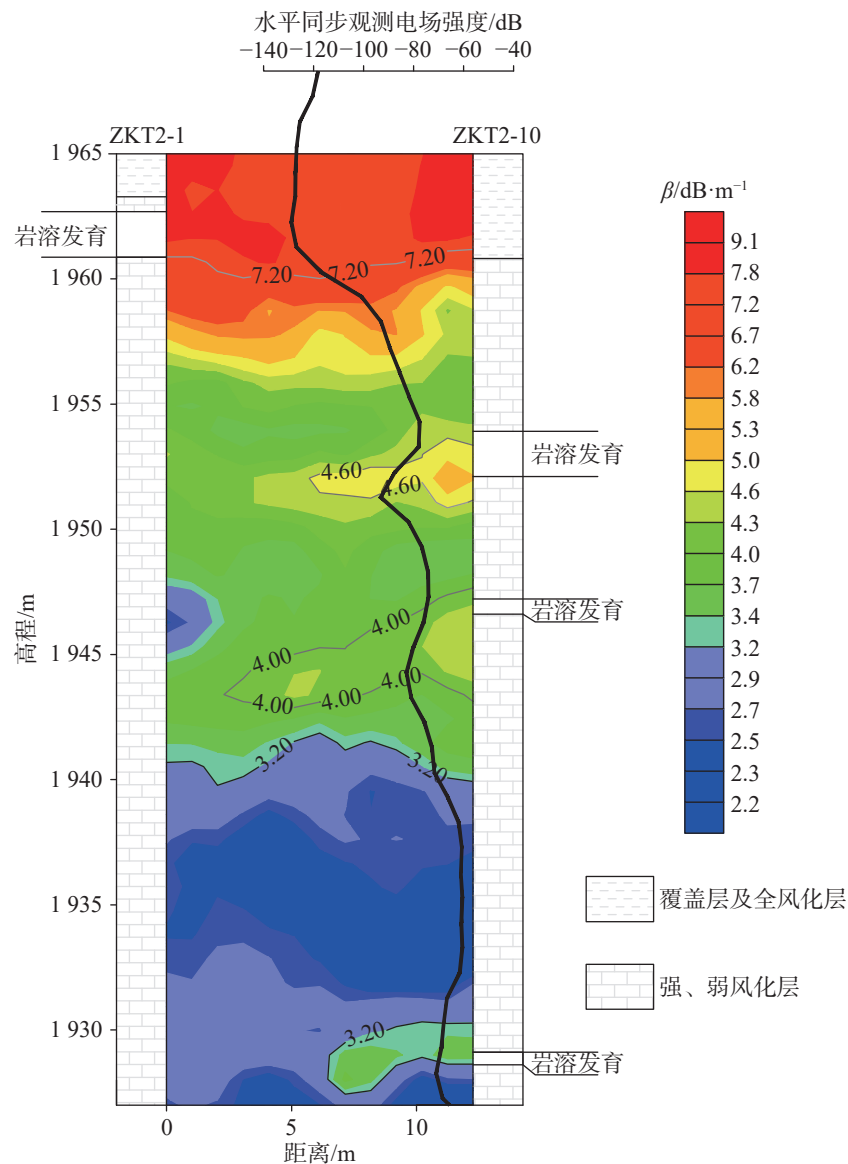


图8 剖面2-1~2-10井间无线电波成像成果图(28 MHz)

Fig. 8 RIM results of Sections 2-1 to 2-10 (28MHz)

电波成像探测精度限制, 太小的溶洞(缝)难以被探测到, 因此井间无线电波成像解译溶洞与钻孔揭露溶洞(缝)的大小分布直方图峰值存在差异。井间无线电波成像结果解译溶洞多为等轴状, 其余为条带状, 部分剖面可见串珠状溶洞发育。

4.3 岩溶发育特征及岩体完整性

井间无线电波成像结果显示, 渡槽线路区各槽墩溶洞发育程度具有差异性, 不同位置岩溶发育特征如下: (1)0~2号槽墩多见直径小于2.5 m溶洞(占比72.5%), 少量见直径大于4.0 m的溶洞, 溶洞发育形态以孤立溶洞为主, 连通性较强; (2)3~6号槽墩多见直径小于3.8 m溶洞(占比84.7%), 最大直径溶洞

8.6 m, 溶洞发育形态以孤立溶洞为主, 连通性较弱; (3)7~14号槽墩多见直径小于2.8 m溶洞(占比87.7%), 最大溶洞直径7.2 m, 溶洞发育形态以孤立溶洞为主, 溶洞间整体连通性较弱; (4)15号槽墩多见直径小于4.4 m溶洞(占比87.5%), 直径大于5.0 m的溶洞共计4个, 最大溶洞直径9.3 m, 溶洞发育形态极不规则, 溶洞间连通性强。

根据电磁波吸收系数等值线图, 不同溶蚀风化带的岩体完整性存在差异。在相对弱溶蚀区, 岩体相对较完整, 溶洞较少发育。强溶蚀区溶洞发育不规则, 溶洞间连通性较好, 钻探揭露多充填软塑—流塑状黏土夹碎石, 岩体呈碎裂结构, 完整性差。



图 9 ZKT2-10 钻孔全景数字成像及钻探取心成果

Fig. 9 Borehole panoramic digital image and core of ZKT2-10

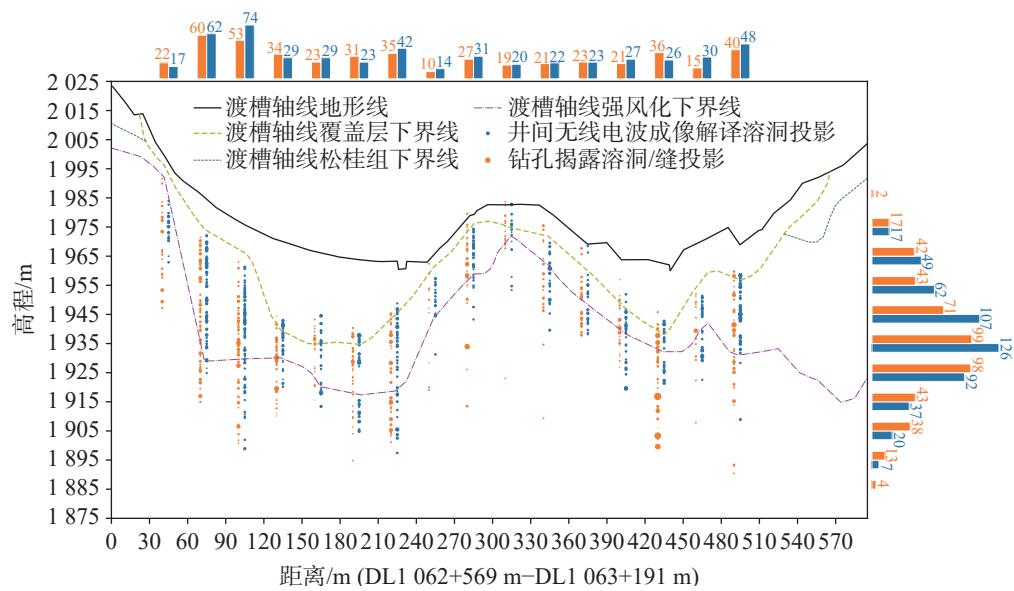


图 10 岩溶分布统计图

Fig. 10 Statistical results of karst distribution

5 结 论

积福村渡槽岩溶区探测成果表明,井间无线电波成像技术能够准确地探测到地下岩溶及破碎区域的空间分布、形态特征及溶洞间的连通特性。水平

同步观测曲线可初步判断地下岩溶发育的深度范围,成像结果则可精确显示出岩溶位置、形态等几何特征,电磁波吸收系数大小可反映岩体相对破碎程度。井间无线电波成像结果与钻探取心及钻孔全景数字成像结果相互印证,有效地补充了钻孔间的地质信息,直观展示了研究区域内地下岩溶发育特征,为渡

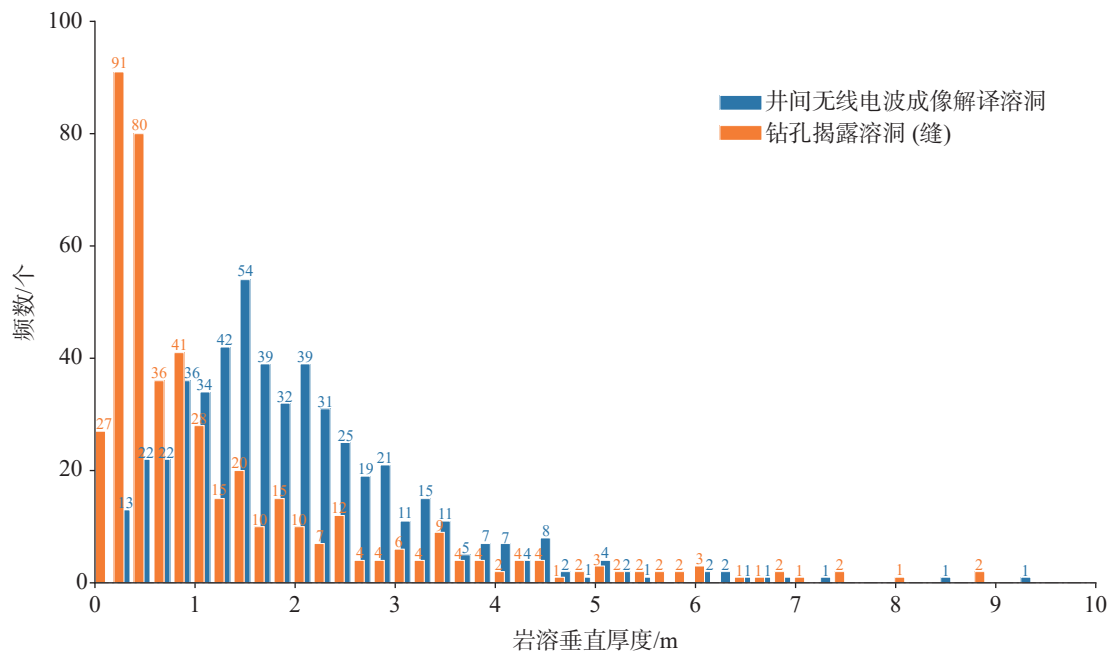


图11 岩溶垂直厚度直方图

Fig. 11 Histogram of vertical karst thickness

槽在施工过程中可能遇到的工程地质问题及应对措施提供了参考依据。

参考文献

- [1] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
HAN Xingrui. Karst hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] 彭浩. 滇东北二叠系阳新灰岩岩溶发育特征及其强度评价探析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
PENG Hao. Analysis of development characteristics of karst and intensity evaluation in Yangxin limestone in northeast Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [3] 张强. 金沙江观音岩电站红层钙质砂岩类岩溶发育特征及渗透稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
ZHANG Qiang. Semi-karst development characteristics and engineering seepage stability of the calcareous sandstone red beds of Guanyinyan Hydropower, Jinsha River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [4] 何伟. 贵州盘县机场岩溶发育特征及地基稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
HE Wei. Research on karst growth law and foundation stability of some airport in Panxian, Guizhou province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [5] 杨丽君, 张杰, 杨宁. 栖霞中桥地区岩溶发育特征及分布规律[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(9): 41-45.
YANG Lijun, ZHANG Jie, YANG Ning. The karst development characteristics and distribution of the Qixia Zhongqiao area[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(9): 41-45.
- [6] 冯文凯, 杨星, 周强, 杨强, 刘志刚. 贵州某机场场地岩溶发育特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 227-233.
FENG Wenkai, YANG Xing, ZHOU Qiang, YANG Qiang, LIU Zhigang. Characteristics and genetic analysis of karst development at an airport site in Guizhou[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 227-233.
- [7] 刘强. 基于电测深技术的叙大铁路震东车站岩溶勘察研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIU Qiang. Research on the karst exploration of Zhendong Station of Xuda railway based on electrical sounding technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] 覃政教. 地面物探在岩溶地基工程勘察中的应用: 以桂林某花园综合楼为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 338-343.
QIN Zhenjiao. Application of the ground physical exploration in karst foundation engineering prospecting: A case study from a comprehensive building in a garden of Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(4): 338-343.
- [9] 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.
WU Yanan. Application of the high-density electrical resistivity method to karst geological exploration in Quanhe, Laiwu City[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 617-623.
- [10] 高强山, 彭韬, 付磊, 王世杰, 曹乐, 程倩云. 探地雷达技术对表层岩溶带典型剖面组构刻画与界面识别[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 759-765.
GAO Qiangshan, PENG Tao, FU Lei, WANG Shijie, CAO Le, CHENG Qianyun. Structure description and interface recognition on epikarst typical profiles using GPR technology[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 759-765.
- [11] 杜成亮, 甘伏平, 张远海, 赵伟, 梁东辉. 地球物理方法探索隐伏岩溶古河道: 以湖南郴州万华岩为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 624-631.

- DU Chengliang, GAN Fuping, ZHANG Yuanhai, ZHAO Wei, LIANG Donghui. Exploratory research on buried karst paleochannels by comprehensive geophysical methods: A case study of Wanhua cave system, Chenzhou, Hunan Province[J]. *Carso-logica Sinica*, 2018, 37(4): 624-631.
- [12] 朱庆俊, 李伟, 李凤哲, 孙银行, 李戌. 广西隆安县地下水储水构造的地质-地球物理模型及其地球物理响应特征分析[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(1): 34-40.
- ZHU Qingjun, LI Wei, LI Fengzhe, SUN Yinhang, LI Shu. Analysis on geologic-geophysical model and geophysical response of groundwater reservoir in Longan County, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(1): 34-40.
- [13] 汤克轩, 赵楠. 可溶岩地层的地球物理特征及其地质解译[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 578-583.
- TANG Kexuan, ZHAO Nan. Geophysical characteristics and geological interpretation of karst strata[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 578-583.
- [14] 梁东辉, 甘伏平, 张伟, 韩凯. 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.
- LIANG Donghui, GAN Fuping, ZHANG Wei, HAN Kai. Study on the effectiveness of the microtremor HVSR method in detecting underground river pipelines and caves in karst areas[J]. *Car-sologica Sinica*, 2020, 39(1): 95-100.
- [15] 郭书兰. 无锡地铁某区段岩溶发育特征及围岩稳定性分析[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- GUO Shulan. Karst characteristics and surrounding rock stability analysis of a karst development section in Wuxi Metro[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [16] 张华, 张贵, 王宇, 方永林, 代旭升, 王波, 何绕生, 罗为群, 蓝芙宁. 岩溶断陷盆地跨孔 CT 成像探测岩溶孔隙及赋水状态的实验研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 737-744.
- ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Yu, FANG Yonglin, DAI Xusheng, WANG Bo, HE Raosheng, LUO Weiqun, LAN Funing. Experimental study on the detection of karst pores by cross-hole CT imaging and groundwater occurrence in the Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 737-744.
- [17] 刘四新, 倪建福. 井间电磁法综述[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(1): 153-165.
- LIU Sixin, NI Jianfu. Review of cross-hole electromagnetic method[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(1): 153-165.
- [18] 王建军, 高建华. 电磁波 CT 技术在某桥墩岩溶勘察中的应用[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(4): 464-467.
- WANG Jianjun, GAO Jianhua. Application of electromagnetic wave CT in the investigation of pier[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(4): 464-467.
- [19] 王伦文, 何俊荣, 尤岭, 李世平. 滇中引水工程大理 I 段积福村渡槽岩溶处理设计[J]. *水利规划与设计*, 2019(12): 151-154.
- WANG Lunwen, HE Junrong, YOU Ling, LI Shiping. The karst treatment design of the aqueduct in Jifu village, Dali section I of the central Yunnan water diversion project[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(12): 151-154.
- [20] 王旺盛, 陈长生, 王家祥, 史存鹏, 李银泉. 滇中引水工程香炉山深埋长隧洞主要工程地质问题[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 154-159.
- WANG Wangsheng, CHEN Changsheng, WANG Jiaxiang, SHI Cunpeng, LI Yinquan. Major Engineering geological problems of Xianglushan deep-buried long tunnel in central Yunnan water diversion project[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(9): 154-159.
- [21] 叶浩, 周云, 房艳国, 罗文行, 吴海斌, 翁文林, 付兴伟. 鹤庆—剑川地区岩溶发育特征及其控制因素[J]. *华南地震*, 2021, 41(2): 19-26.
- YE Hao, ZHOU Yun, FANG Yanguo, LUO Wenxing, WU Haibin, WENG Wenlin, FU Xingwei. The development characteristics and controlling factors of Heqing-Jianchuan karst[J]. *South China Journal of Seismology*, 2021, 41(2): 19-26.
- [22] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- LI Jinming. Geoelectric field and electrical exploration[M]. Beijing: Geology Press, 2005.
- [23] 王薇, 邓小虎, 金聪, 周红伟, 林松. 电磁波 CT 揭露重大工程岩溶发育特征: 以某地铁岩溶勘察为例[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(34): 13977-13982.
- WANG Wei, DENG Xiaohu, JIN Cong, ZHOU Hongwei, LIN Song. The characteristics of karst development in major projects revealed by electromagnetic wave computed tomography: A case for karst investigation of a metro[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(34): 13977-13982.
- [24] 欧洋, 高文利, 李洋, 王宇航. 估计辐射参数的井间电磁波层析成像技术[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(10): 3843-3853.
- OU Yang, GAO Wenli, LI Yang, WANG Yuhang. Cross-well electromagnetic imaging method with radiation parameter estimation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(10): 3843-3853.
- [25] 黄生根, 刘东军, 胡永健. 电磁波 CT 技术探测溶洞的模拟分析与应用研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 544-550.
- HUANG Shenggen, LIU Dongjun, HU Yongjian. Simulation analysis and application study of electromagnetic wave computed tomography in detecting karst caves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 544-550.
- [26] 岳崇旺. 井间电磁波层析成像研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- YUE Chongwang. Study on the cross-well electromagnetic tomography and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [27] 赵威. 电磁波 CT 几种常用成像方法应用效果对比[J]. *工程地球物理学报*, 2019, 16(5): 749-754.
- ZHAO Wei. Comparison of application effects of several common electromagnetic wave CT imaging methods[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2019, 16(5): 749-754.
- [28] 武焕平. 井间电磁波 CT 成像图像重建算法[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

WU Huanping. Image reconstruction algorithm of cross-well electromagnetic wave CT imaging[D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[29] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 钻孔电磁

波法技术规程: DZ/T 0404-2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022.
Natural Resources and Territory Spatial Planning. Technical code for borehole electromagnetic wave method: DZ/T 0404-2022[S]. Beijing: Geology Press, 2022.

Study on karst development characteristics using cross-hole radio imaging method: A case of karst detection of Jifucun aqueduct in the Central Yunnan Water Diversion Project

QIN Ruidong¹, SUN Guanjun¹, LU Kai², SHI Cunpeng¹, LU Mingxuan¹, LI Wei¹, DU Lixuan¹

(1. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 2. College of Geology and Environment,
Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract Karst development represents a common geological phenomenon, giving rise to a variety of hazards during engineering construction. These risks include structural cracks, tilting, and even building collapses, posing significant challenges to project progress, safety, and cost efficiency. To effectively address these issues, karst exploration plays a crucial role in engineering construction, as it facilitates the identification of geological anomalies and the mitigation of potential dangers. Moreover, it provides a solid foundation for project implementation. In areas characterized by karst development, a comprehensive understanding of the perils associated with this geological phenomenon becomes imperative. Therefore, placing a greater emphasis on karst exploration becomes indispensable for us to adopt effective prevention and treatment measures that ensure project quality and safety.

The Jifucun aqueduct, situated in Songgui town of Heqing county, Yunnan Province, is a vital component of Segment I of Dali of the Central Yunnan Water Diversion Project. The geological composition surrounding the aqueduct route consists of the Upper Triassic Zhongwuo Formation (T_3z), which comprises limestone intermixed with muddy limestone. Surface karst features are predominantly characterized by dissolution grooves and small sinkholes, while underground karst formations consist of dissolution caves, fractures, and gaps. The thickness of strongly dissolved and weathered limestone in the aqueduct area generally ranges from 9 m to 50 m. The pile foundation structure exhibits non-uniformity, which gives rise to concerns regarding the deformation and stability of the karst foundation.

In this study, cross-hole Radio Imaging Method (RIM) was employed to detect the karst development at the position of each pile foundation of the aqueduct piers. By integrating the results from drilling core data and borehole panoramic digital images, a comprehensive comparative analysis was conducted to discern the characteristics and patterns of karst development within the study area.

The RIM observation data, based on the established criteria for evaluating data quality, achieves the highest classification: Class I. By extracting (quasi) curves of horizontal synchronous electric field intensity from the complete set of observational data for a given section, valuable insights can be obtained regarding the approximate location of subsurface karst and the overall integrity of the underlying rock mass. Through meticulous data preprocessing, including a comprehensive review of the observation system parameters and the removal of erroneous data points, the inversion process employs the Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT) to determine the absorption coefficient of the electromagnetic wave between the two boreholes. Significantly, the areas exhibiting notably high absorption anomalies in the inversion results closely align with the findings obtained from core drilling data and panoramic digital images of boreholes.

The detection results reveal that the curves of horizontal synchronous observation effectively illustrate the depth range of distribution of subsurface anomalies. Furthermore, the RIM provides valuable insights into the boundaries, shapes, and absorption coefficients of these abnormal areas, yielding significant geological information regarding the

form, extent, and intensity of underground karst development. Additionally, they illuminate the regional scope and fragmentation degree of the rock mass fracture zone. The RIM results accurately depict crucial geological details, including the location and shape of underground karst and the integrity of the rock mass, and they demonstrate a high degree of concurrence with the karst anomalies revealed through borehole panoramic digital imaging and results of drilling cores. Hence, the RIM emerges as a reliable and efficient method for detecting karst formations, offering direct insights into the developmental traits and extent of underground karst, which serves as a valuable scientific reference for the planning and implementation of aqueduct engineering projects.

Key words cross-hole radio imaging method, karst detection, characteristics of karst development, Central Yunnan Water Diversion Project

(编辑 杨杨)

(上接第 656 页)

Iran, Thailand, and South China reveals that the lithology and tectonics of soluble rocks serve as intrinsic drivers of karst development, establishing the fundamental framework for karst processes. Meanwhile, climate acts as an extrinsic driving force, with both factors jointly shaping the development of karst landforms. Taking the karst in South China as an example, this study analyzes the influence of tectonic uplift on the differentiation of karst landforms. Distinct vertical hydrological profiles and erosion-dissolution base levels have been formed during different geological periods. To adapt to changes in these base levels, karst geomorphological zones have been developed at varying elevations. Moreover, the significant disparities in elevation also induce variations in climate, hydrology, and tectonic conditions, which in turn cause geomorphological differentiation in karst landforms. Meanwhile, China's Qinghai-Xizang Plateau on the first terrain ladder is characterized by high altitude, low temperatures, and scarce rainfall. The development of modern karst is limited in this region, exhibiting only micro-karst formations on rock surfaces. In contrast, Southwest China (Yunnan, Sichuan, and Chongqing), located on the second terrain ladder, experiences abundant rainfall and steep slopes. This area undergoes intense fluvial downcutting, forming canyons and peak-cluster valleys. Meanwhile, Guangxi (China), Thailand, and other Indochina Peninsula plains lie on the third terrain ladder. These areas are characterized by a hot, humid climate and low-elevation terrains near sea level, exhibiting vigorous surface and subsurface karstification and developing classic karst landforms such as peak-cluster valleys, peak-forest plains, and isolated-peak plains.

Key words the Belt and Road, karst landform, distribution range, development characteristics, comparative analysis

(编辑 黄晨晖)