

文章编号:1671-8879(2018)05-0221-10

溶洞在电阻率层析成像图中的 成像特征及其解释推断

魏 锋^{1,2}, 陈忠达¹, 张 震¹, 朱耀庭³, 胡文华⁴, 吴福泉⁴

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068;
3. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330052; 4. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 341000)

摘 要:为研究溶洞在电阻率层析成像图中的成像特征,对江西省南昌—上栗高速公路沿线岩溶地层进行勘察,并建立相应的数值模型进行正演。在已勘明的溶洞中,分别选取大跨度空溶洞、大跨度填充溶洞、小跨度空溶洞及小跨度填充溶洞,观察其成像特征,分析得到不同厚跨比及填充情况下的溶洞在电阻率层析成像图中的成像特征,从而建立溶洞成像特征树图。模拟均匀空间中同时存在高阻介质和低阻介质的情况,并与勘察结果对比。最后在工程实际中应用溶洞成像特征树图,进行电阻率层析成像图的解释推断,同时结合钻探成果验证该方法的正确性。结果表明:高阻异常和低阻异常主要出现于大跨度空溶洞和大跨度填充溶洞,而在小跨度空溶洞和小跨度填充溶洞中并不明显;等值线弯折必然存在于填充型溶洞,且经常伴随低阻异常出现。数值模拟发现,等值线总是倾向于向低阻介质聚集,从而产生等值线弯折的现象;与此同时,由于电阻率等值线聚集于低阻介质附近,延伸受到很大限制,从而产生低阻屏蔽效应。在溶洞跨度较大的情况下,成像特征主要表现为高阻异常和低阻异常,解释推断较为简单;但在溶洞跨度较小的情况下,由于低阻屏蔽效应,小跨度空溶洞或较薄的溶洞顶板等高阻介质经常被遮盖,为解释推断带来较大困难。

关键词:交通信息与控制工程;溶洞;电阻率;成像特征;电阻屏蔽;解释

中图分类号:U416.16;TN911.73 **文献标志码:**A

Imaging characteristics and interpretation for karst caves using electrical resistivity tomography

WEI Feng^{1,2}, CHEN Zhong-da¹, ZHANG Zhen¹, ZHU Yao-ting³, HU Wen-hua⁴, WU Fu-quan⁴

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Highway Bureau, Xi'an 710068, Shaanxi, China;
3. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330052, Jiangxi, China;
4. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co., Ltd, Nanchang 341000, Jiangxi, China)

Abstract: To study the imaging characteristics of a cave using electrical resistivity tomography, the resistivity characteristics of karst strata along the Nanchang to Shangli Highway (Jiangxi, China) were investigated. Corresponding numerical models were established for forward

收稿日期:2018-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51508246);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821175026);

江西省交通运输厅科技项目(2015C0022)

作者简介:魏 锋(1982-),男,陕西西安人,陕西省公路局高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:super1070@sina.cn.

modeling. In the karst caves that were identified, long-span empty caverns, long-span filled caverns, short-span empty caverns, and short-span filled caverns were selected for observation. The imaging characteristics of caves with different sizes and fillings were then obtained. A tree diagram for the analysis of the imaging characteristics of karst caves was proposed. The existence of high-resistance and low-resistance media in homogeneous spaces was simulated and then compared with survey results. Finally, the imaging feature analysis tree diagram of the karst cave was applied to engineering practice for interpretation of resistivity tomography images. At the same time, the correctness of the method was verified by drilling results. The results show that both high-resistivity and low-resistivity anomalies exist mainly in the long-span empty caves and long-span filled caves, rather than in the short-span empty caves and short-span filled caves. Contour line bending always exists in the filled karst cave and is often accompanied by low-resistivity anomalies. The contours gather in the low-resistance medium, which bends the contour lines. At the same time, owing to gathering of these resistivity contours near low-resistivity media, the extension of which is greatly limited, resulting in low-resistivity shielding effects. In short-span caverns, owing to the low-resistance screening effect, high-resistance media such as short-span empty caverns or thinner cavern roofs are often covered, which makes it difficult to explain. 10 figs, 25 refs.

Key words: traffic information and control engineering; karst cave; electrical resistivity; imaging characteristic; resistance shielding; explain

0 引言

岩溶地貌形态和地质条件^[1-4]较为复杂,可靠地勘察岩溶发育特征非常重要。电阻率层析成像技术已成为勘察岩溶发育特征的主要手段之一。刘秀敏等结合电阻率层析成像、探地雷达等技术,探明研究区地层结构与岩溶洞穴分布情况,并通过实际应用,验证了该方法有效可靠^[5]。杨天春等以某在建小区的区域勘探为例,利用电阻率层析成像技术和光滑约束最小二乘法获得勘探区域内溶洞的分布情况^[6]。郭栋栋等以泰安市岩溶地面塌陷为例,应用电阻率层析成像技术探测岩溶地面塌陷成因,并进行了推断反演^[7]。周文龙等采用数值模拟法对充水溶洞特征的高密度电阻率法进行了反演分析,获得了电阻率与溶洞充水量之间的关系^[8]。Carrière等以典型地中海地区为分析对象,利用探地雷达和电阻率层析成像来综合研究岩溶不饱和区结构,发现这2种地球物理技术在探测深度上的互补性^[9]。Park等结合数值模拟和反演方法进行分析,发现电阻率层析成像技术能有效探测地下石灰岩空腔^[10]。Akiyama等采用电阻率层析成像技术,揭示了岩溶地区的浅层地下结构和水文环境状况^[11]。Redhounia等采用电阻率层析成像技术获得了岩溶地区地下空洞的空间分布和形态^[12]。Festa等分析了岩

石的电阻率与其岩性组成的关系,以及破裂和含水率的影响^[13]。McCormack等以爱尔兰贝尔海港的岩溶地貌为例,结合电阻率层析成像技术和离散管网模型,确定水流路径及其可能的水力机制来表征集水区的水文地质特征^[14]。Bermejo等进行二维电阻率层析成像模拟试验,分析了岩溶和遗址的形成过程^[15]。然而,现有文献多为勘察岩溶的位置及其发育特征,对其成像特征讨论较少。厚跨比、顶板厚度以及填充物对视电阻率、勘察精度有明显影响。在溶洞较小、顶板厚度较大或者存在低阻覆盖层的条件下,电阻率层析成像的可靠性将明显下降,甚至失效。

本文对高速公路沿线岩溶发育状况进行勘察,建立溶洞数值模型,通过正演分析厚跨比、顶板厚度以及填充物的影响,分析低阻屏蔽效应及等值线向下弯折的原因。总结典型溶洞的成像特征,并建立溶洞成像特征树图。最后在依托项目中进行电阻率层析成像图的解释推断,同时结合钻探成果确定了各地层的视电阻率范围。

1 研究区域地质特征及岩溶发育状况

南昌—上栗高速公路主要路线走廊带位于扬子准地台与华南褶皱系交接的江西著名地质构造,即萍乡—乐平近东西向拗陷带内的西北缘。在整个路

线走廊带中, K47+200~K53+300 段和 K120+987~K127+250 段处于江西省灰岩岩溶最发育的地区之一。整个路线带广泛发育有二叠系茅口组、小江边组、栖霞组的灰岩、泥灰岩及硅质灰岩及石炭系船山组、黄龙组的灰岩、白云质灰岩。由于灰岩层处在地质构造发育带和地下径流较强烈带, 路线区的灰岩, 特别是茅口组、栖霞组、船山组和黄龙组的灰岩岩溶非常发育, 对公路工程建设, 如路基稳定、桩基础稳定的影响非常大^[16-17]。

2 电阻率层析成像测试过程

由于研究区域内广泛分布溶洞, 路基经常发生塌陷, 同时也造成工程费用提高。为此开展了高速公路沿线的岩溶发育状况评估, 项目覆盖了总长度超过 3.9 km 的高速公路沿线岩溶塌陷高发区。为查明沿线岩溶发育情况, 使用重庆地质仪器厂生产的 DUK-2 型电阻率测量系统(图 1), 分别于 K178+550~K179+150 段布置 1 条测线(图 2), K179+800~K182+500 段布置 10 条测线, K183+300~K183+600 段布置 3 条测线。与此同时, 沿线共进行 137 组钻芯取样试验, 用于电阻率层析成像的标定和校正。结合地质资料、钻孔资料可知, 研究区域内存在多个低阻异常区, 多分布于基岩面(即岩土接触面)附近, 最小埋深 6 m, 最大埋深 30 m。地层主要由上覆沉积物和下伏灰岩构成。

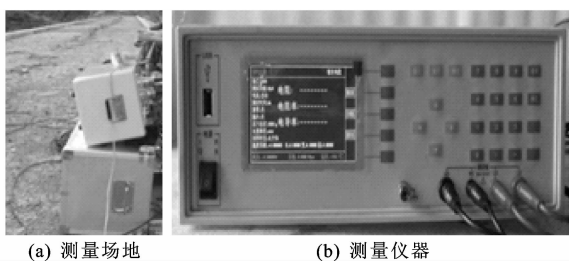


图 1 电阻率测量系统

Fig. 1 Electrical resistivity test system

3 数值模拟及影响因素分析

为探寻溶洞在电阻率层析成像图中的成像特征及其影响因素, 采用 RES2DMOD 软件建立数值模型进行正演。模型中: 溶洞顶板厚度为 h ; 溶洞形状为正方形, 跨度与高度均为 l 。将填充物以空气为主的称为空溶洞; 将填充物以土为主的称为填充溶洞。假设土电阻率 ρ_s 为 $50 \Omega \cdot \text{m}$; 空气电阻率 ρ_a 为 $100\,000 \Omega \cdot \text{m}$; 岩层电阻率 ρ_r 为 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。

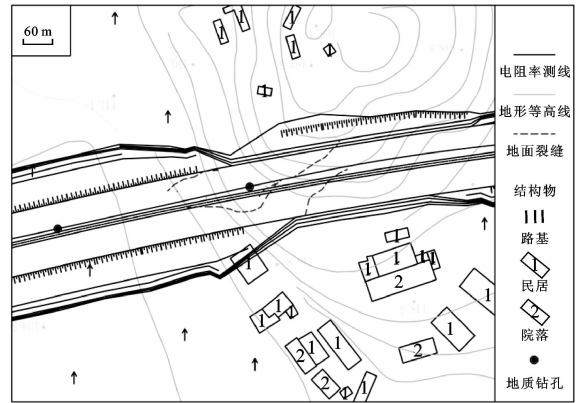


图 2 电阻率层析成像测线及钻孔布置

Fig. 2 Electrical resistivity test lines and borehole layouts

3.1 厚跨比对成像特征的影响

在岩溶地区修筑路基, 经常遇到有关溶洞顶板的安全跨度问题^[18-20]。目前, 规范一般采用厚跨比作为安全跨度的判别标准。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 结合铁路科研成果和北京-珠海高速公路粤境北段的实践经验, 认为当厚跨比 $h/l \leq 0.8$ 时溶洞顶板存在失稳的可能性。因此, 厚跨比 $h/l \leq 0.8$ 的溶洞须作为勘察重点。本文将 $h/l > 0.8$ 的溶洞称为小跨度溶洞, 将 $h/l \leq 0.8$ 的溶洞称为大跨度溶洞。

采用斯龙倍格装置进行成像分析, 厚跨比对成像特征的影响如图 3 所示。模型中, 溶洞无填充, 顶板厚度 h 为 10 m。由图 3 可知: 大跨度溶洞高阻异常较为明显, 视电阻率可到 $1\,500 \Omega \cdot \text{m}$; 小跨度溶洞的高阻异常也较明显, 但其视电阻率最高约 $1\,100 \Omega \cdot \text{m}$, 仅略大于岩层的电阻率 ($1\,000 \Omega \cdot \text{m}$)。

3.2 埋深对成像特征的影响

埋深对成像特征的影响如图 4 所示。模型中, 溶洞无填充, 跨度 l 为 4 m。由图 4 可知: 当埋深较小时, 小跨度溶洞也可以被发现; 当埋深增大时, 高阻异常逐渐减弱甚至消失, 视电阻率也随之降低至与围岩相同的 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。因此, 勘察埋藏较深的溶洞时, 电阻率层析成像可靠性不高。

可以发现, 在低阻背景中, 高阻介质的视电阻率远小于其实际电阻率。高阻介质的范围越小, 埋藏越深, 视电阻率越低。在图 4 所示的模型中, 尽管溶洞的实际电阻率高达 $100\,000 \Omega \cdot \text{m}$, 但视电阻率最高仅有 $1\,200 \Omega \cdot \text{m}$ 。此外, 视电阻率还受到空隙率、含水率等因素的影响。在雨季和旱季, 地层电阻率也有很大差别。因此, 在分析地层与视电阻率对应关系时, 应采用钻探等手段辅助判别。

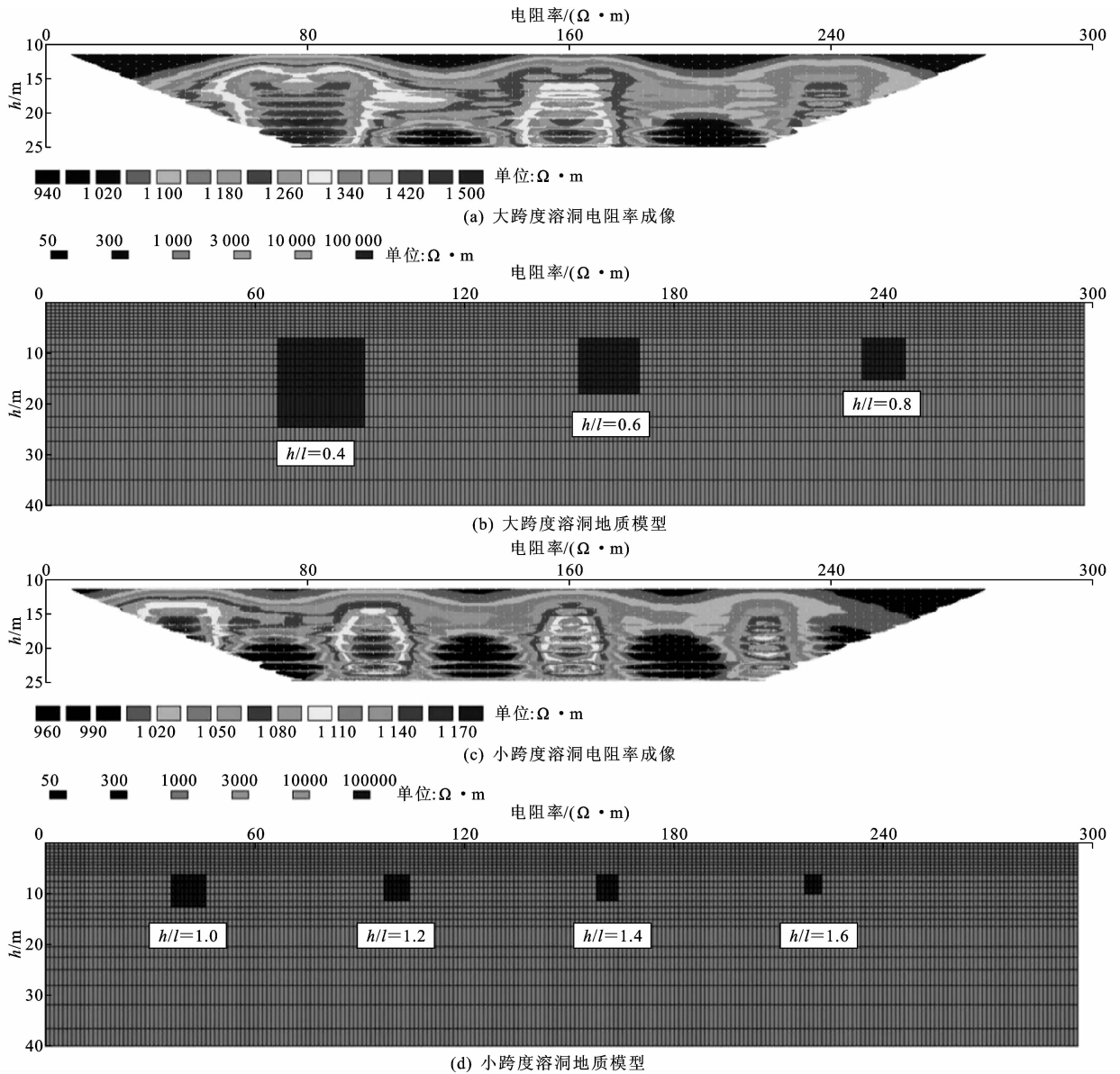


图3 厚跨比对成像特征的影响

Fig. 3 Effect of thick-span ratios on imaging

3.3 填充物含量对成像特征的影响

填充物含量对成像特征的影响如图5所示。模型中溶洞顶板厚度 h 为5 m。由图5可知:当填充物含量小于50%时,在成像图中反映为高阻异常;当填充物含量较多时(接近100%),在成像图中反映为低阻异常;当填充物含量介于50%~100%时,判别较为困难,但采用斯龙倍格装置可以改善其成像。因此,在填充物含量较多的情况下,建议采用斯龙倍格装置进行探测。

4 典型溶洞成像特征

4.1 大跨度空溶洞的成像特征

K174+205处下伏大跨度空溶洞,溶洞高度约

13 m,顶板厚度约17 m,由于洞内所充填空气的高阻特性,与围岩存在较大的物性差异,对应的电阻率值为1 200~5 400 $\Omega \cdot m$,显示为高阻异常见图6(a)。高阻异常是空溶洞的一种重要成像特征,两者之间存在较好的对应关系^[8,21-22]。

4.2 大跨度填充溶洞的成像特征

K179+965处下伏大跨度填充溶洞,溶洞高度约19 m,顶板厚度约1.5 m。由于围岩风化严重,较为破碎,洞内充填大量砾石和黏土,导致电阻率大幅度降低(60~150 $\Omega \cdot m$),显示出低阻异常的特征,同时伴随有等值线向下弯折的现象,见图6(b)。溶洞顶板理论上应具有与围岩相当的电阻率(100~400 $\Omega \cdot m$),但是由于顶板厚度较薄且

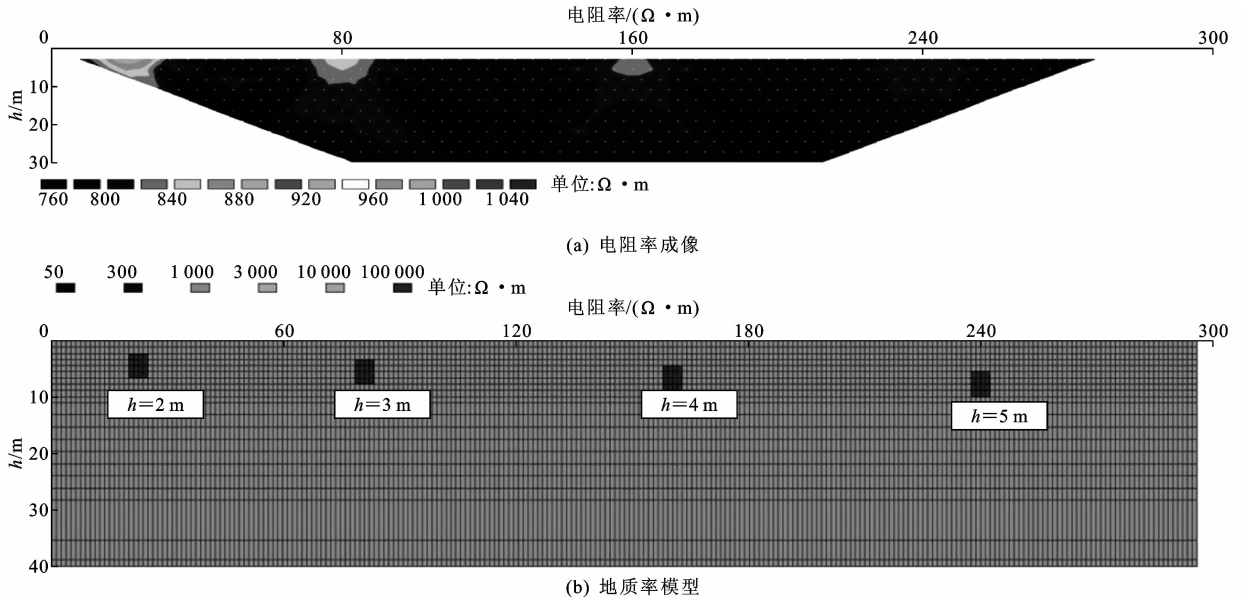


图 4 溶洞埋深对成像特征的影响
Fig. 4 Effect of cave depth on imaging

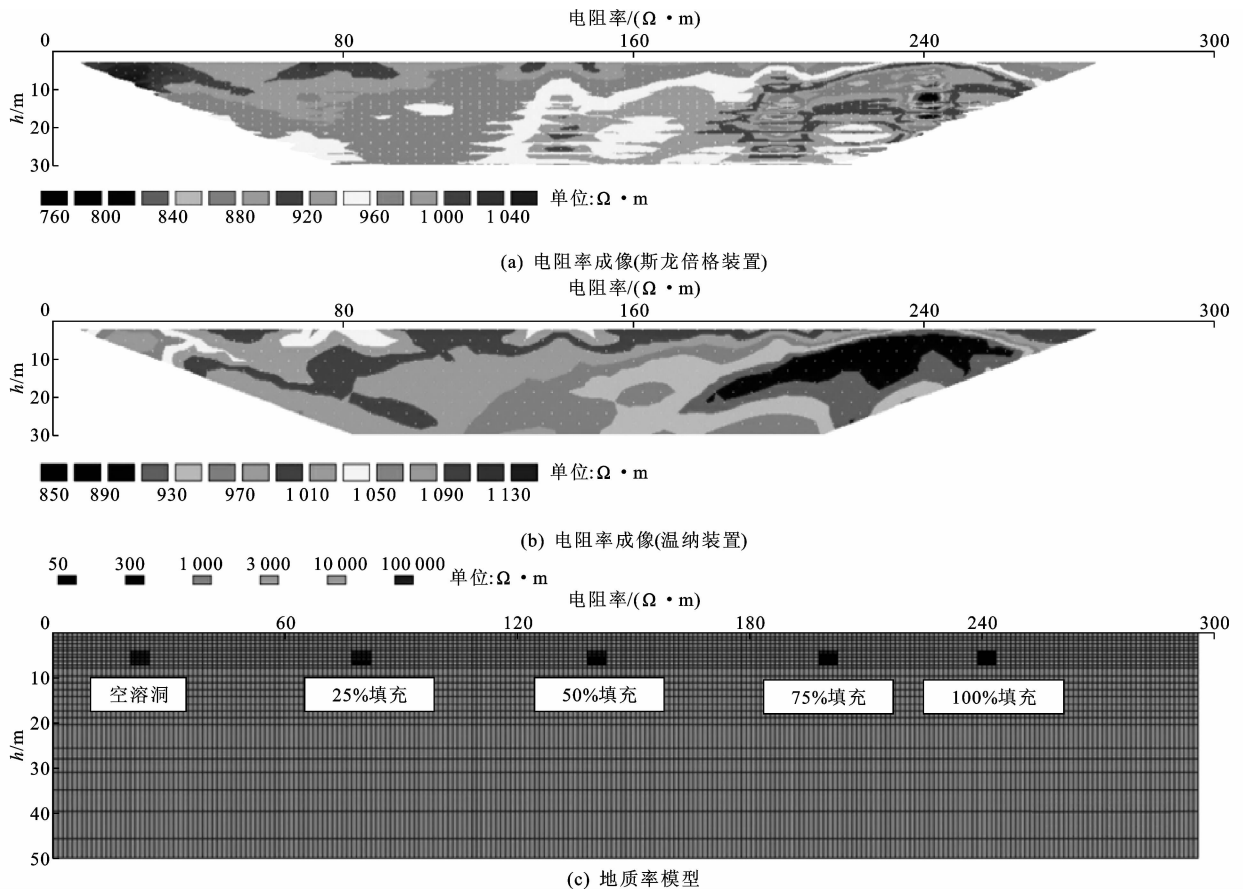


图 5 填充物含量对成像特征的影响
Fig. 5 Effect of filling contents on imaging

被夹在低阻层中间(其上土层为低阻层,其下溶洞填充物亦为低阻层),通电后出现低阻屏蔽效应,导致电阻率降低至 $80 \sim 120 \Omega \cdot m$ 。从图 6(b)可知,低阻异常常伴随着等值线向下弯折一起出现。因此,

可以将等值线向下弯折和低阻异常视为大跨度填充溶洞的重要成像特征。

4.3 小跨度空溶洞的成像特征

K178+900 处下伏小跨度空溶洞,溶洞高度约

5 m,在电阻率层析成像图中对应 $400\sim 650\ \Omega\cdot\text{m}$ 的弱高阻异常,见图 6(c)。空溶洞理论上应显示出比围岩($100\sim 400\ \Omega\cdot\text{m}$)高的电阻率值,实际上在电阻率层析成像图中只显示了 $400\sim 650\ \Omega\cdot\text{m}$ 的弱高阻。主要是由于溶洞跨度较小,被其周围的低阻层(围岩)屏蔽,导致电阻率值降低。因此,可以将弱高阻视为小跨度空溶洞的重要成像特征。

4.4 小跨度填充溶洞的成像特征

K176+370 和 K176+385 处下伏约 5 m 高的小跨度填充溶洞,视电阻率值在 $70\sim 120\ \Omega\cdot\text{m}$,显示出等值线向下弯折的现象,同时表现出不明显的低阻异常现象,见图 6(d)。出现等值线向下弯折的原因可能是灰岩顶板较薄,在某些部位存在裂隙,而地下水的交换在此附近较为频繁,从而导致顶板和溶洞中的填充物含水率提高,电阻率降低。

根据上述分析可知:大跨度空溶洞在电阻率层析成像图中具有高阻异常的成像特征($1\ 200\sim 5\ 400\ \Omega\cdot\text{m}$);大跨度填充溶洞兼有等值线向下弯折和低阻异常的特征;小跨度空溶洞呈现为弱高阻的特征($400\sim 650\ \Omega\cdot\text{m}$);小跨度填充溶洞主要呈现为等值线向下弯折特征。高阻异常和低阻异常主要出现于大跨度空溶洞和大跨度填充溶洞,而在小跨度空溶洞和小跨度填充溶洞中并不明显。

基于上述分析,还可以建立溶洞成像特征树图,如图 7 所示。图 7 中,实线箭头表示必然存在于,虚线箭头表示可能存在于。可知:等值线弯折必然存在于填充型溶洞;高阻异常必然存在于大跨度空溶洞,可能存在于小跨度空溶洞;低阻异常必然存在于大跨度填充溶洞,可能存在于小跨度填充溶洞。由此可见,若仅将高阻异常区和低阻异常区解释为溶洞,则有可能遗漏掉小跨度溶洞的判别。注意到弱高阻、等值线向下弯折等现象,可以避免漏判溶洞。

5 低阻屏蔽效应及等值线向下弯折的形成

在溶洞成像特征的分析过程中已经发现,使用电阻率层析成像技术调查溶洞常出现低阻屏蔽效应^[23-25]。对小跨度溶洞进行探测时低阻屏蔽作用尤其明显,其原因主要是高阻规模较小,且被其周围的低阻层环绕。在对大跨度填充溶洞进行探测时顶板位置也会出现低阻屏蔽效应,可能是由于高阻顶板被夹在低阻填充物和低阻上覆土层之间。在对大跨度空溶洞进行探测时可较理想地呈现高阻异常特征,因高阻溶洞的规模较大,其上覆土层的低阻屏蔽

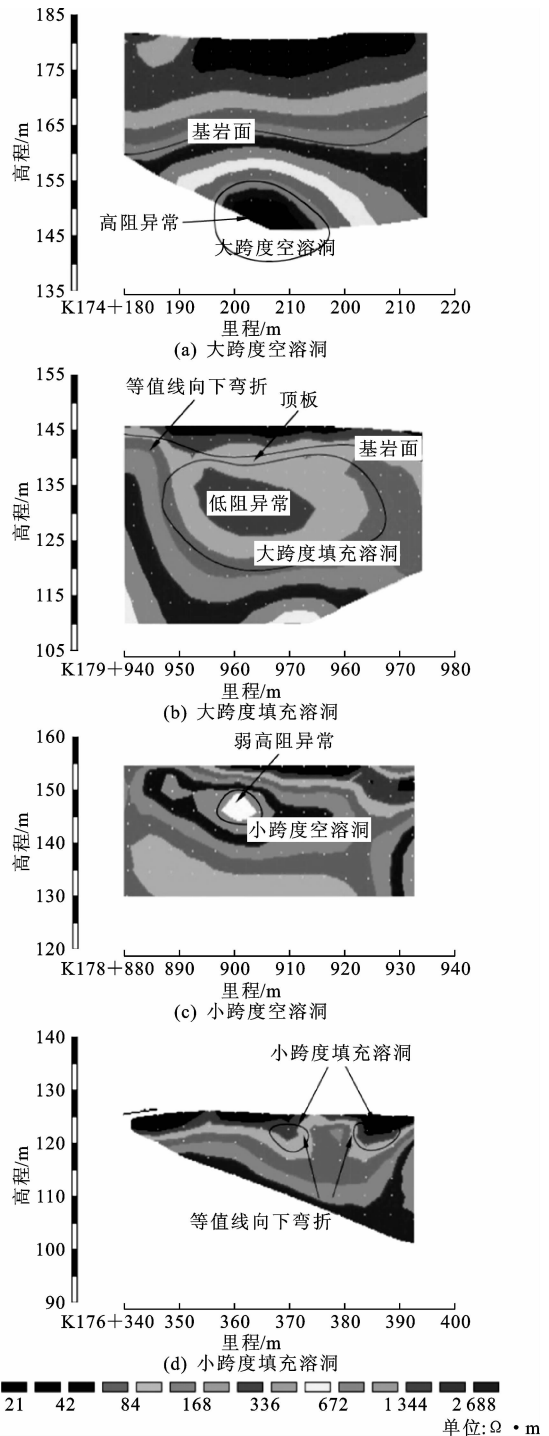


图 6 溶洞成像特征

Fig. 6 Cave imaging features

效应不明显。下文采用正演法,针对溶洞在电阻率层析成像图中频繁出现低阻屏蔽效应及等值线向下弯折进行解释。

模拟均匀空间中同时存在高阻介质和低阻介质的情况,假定背景介质电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,左侧高阻介质电阻率为 $2\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,右侧高阻介质电阻率为 $2\ 500\ \Omega\cdot\text{m}$,低阻介质电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,计算

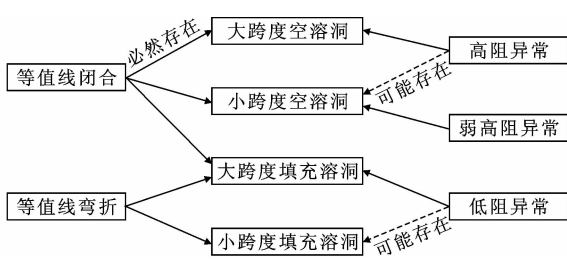


图 7 溶洞成像特征树图

Fig. 7 Cave imaging feature tree

结果如图 8 所示。由图 8 可知,电阻率等值线在低阻介质处发生显著畸变,等值线向下方的低阻介质

靠拢,从而产生等值线向下弯折的现象。因此,等值线向下弯折常伴随着低阻介质出现。同时可以发现:在不受低阻介质干扰的一侧,电场可以有效传入下方;而在被低阻介质干扰的一侧,电阻率等值线聚集于低阻介质附近,延伸受到很大限制。因此,若低阻介质范围较大,形成覆盖层,或高阻介质范围很小,被低阻介质覆盖,都可能会阻止电场向高阻介质中传播,从而形成低阻屏蔽效应。图 6 在调查小跨度空溶洞、小跨度填充溶洞和大跨度填充溶洞的成像特征时其受到低阻屏蔽作用的影响均与此有关。

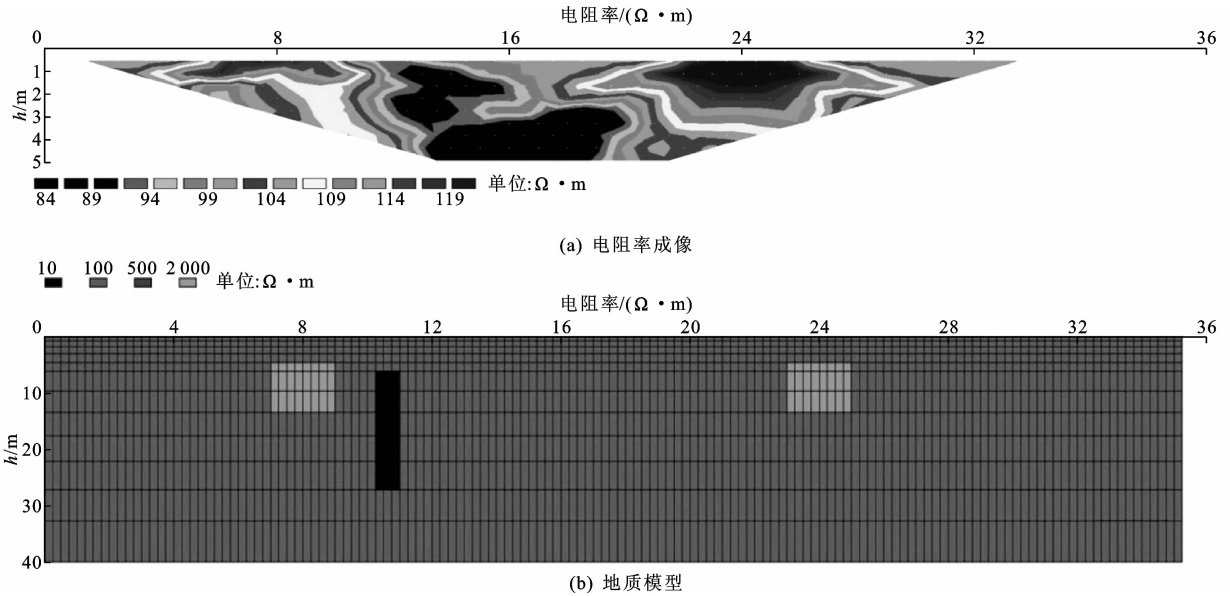


图 8 均匀空间中同时存在高阻介质和低阻介质的电阻率等值线

Fig. 8 Resistivity contours of high-resistance and low-resistance media in a uniform space

6 电阻率层析成像图的解释推断

由于低阻效应的存在,高阻介质(空溶洞或较薄的溶洞顶板)经常被遮盖,这为小跨度空溶洞、小跨度填充溶洞和大跨度填充溶洞的解释推断带来较大困难。为解决此问题,本文将溶洞成像特征树图应用于电阻率层析成像图的解释推断,同时根据钻探成果进行验证,具体步骤如下:①寻找成像图中是否存在高阻异常、低阻异常、弱高阻异常和等值线向下弯折等异常特征,根据异常特征初步推断溶洞大小及是否填充;②在发现异常特征的部位补充钻探进行验证,同时结合钻探分析电阻率层析成像中各类土和岩石的电阻率范围。

6.1 异常特征的分析与验证

K178+650 和 K178+750 附近存在大范围的高阻异常区,根据溶洞成像特征树图可知,此处很可能分布有大跨度空溶洞。钻探样品 BH1、BH2(图

9)表明,K178+650 处下伏约 11.5 m 高的大跨度空溶洞,K178+750 处下伏约 13 m 高的大跨度空溶洞,从而证实了本文推测。

K178+800 附近存在小范围且不明显的低阻异常,根据溶洞成像特征树图可知,此处可能分布有小跨度填充溶洞,而在低阻异常右侧发现的等值线弯折进一步证实了这种可能性。钻探样品 BH3(图 9)表明,K178+800 附近下伏约 5 m 高的溶洞,主要由黏土、角砾土和砾石充填,顶板厚度约 0.7 m。高阻顶板理论上具有大于 100 Ω·m 的电阻率(风化程度较高的灰岩),但由于被夹在低阻填充物和低阻上覆土层之间,产生低阻屏蔽作用,因而在电阻率层析成像图中仅显示出 60~80 Ω·m 的电阻率。

6.2 地层电阻率范围的推测及绘制

经过电阻率层析成像剖面 and 钻孔样品之间的比较(图 9),可以推测各类土和岩石的电阻率范围。将钻孔样品与电阻率层析成像剖面对比可知,小于

30 $\Omega \cdot m$ 的电阻率区应为黏性土;30~50 $\Omega \cdot m$ 的电阻率区应为砾质黏性土;50~100 $\Omega \cdot m$ 的电阻率区应为角砾土;100~1 300 $\Omega \cdot m$ 的电阻率区应为灰岩;1 300 $\Omega \cdot m$ 以上的电阻率区应为溶洞。由于研究区域地下水较为丰富,地层中含水量较高,导致电阻降低,因此以上各地层对应的电阻率范围略低于其他地区。如 Bermejo 等在西班牙布尔戈斯进

行岩溶勘察,并推测灰岩电阻率在 700~3 000 $\Omega \cdot m$,空溶洞电阻率在 6 000 $\Omega \cdot m$ 以上^[15]。Redhaouia 等在突尼斯进行勘察,推测空溶洞电阻率在 1 000~6 000 $\Omega \cdot m$ ^[12]。

根据以上各类土和岩石的电性差异,绘制各地层在电阻率层析成像解释图中的位置。最终得到的电阻率层析成像解释图如图 10 所示。

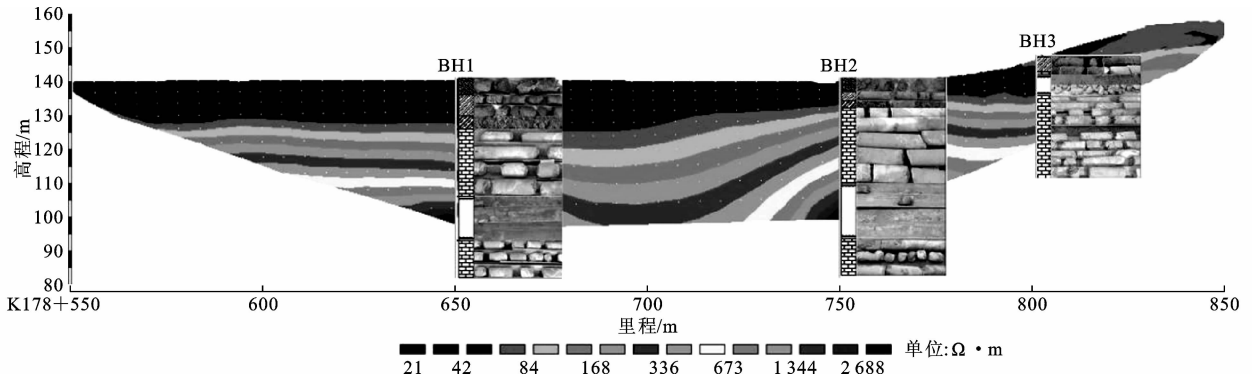


图 9 电阻率层析成像剖面和钻孔样品之间的比较

Fig. 9 Comparisons between resistivity tomography profiles and borehole samples

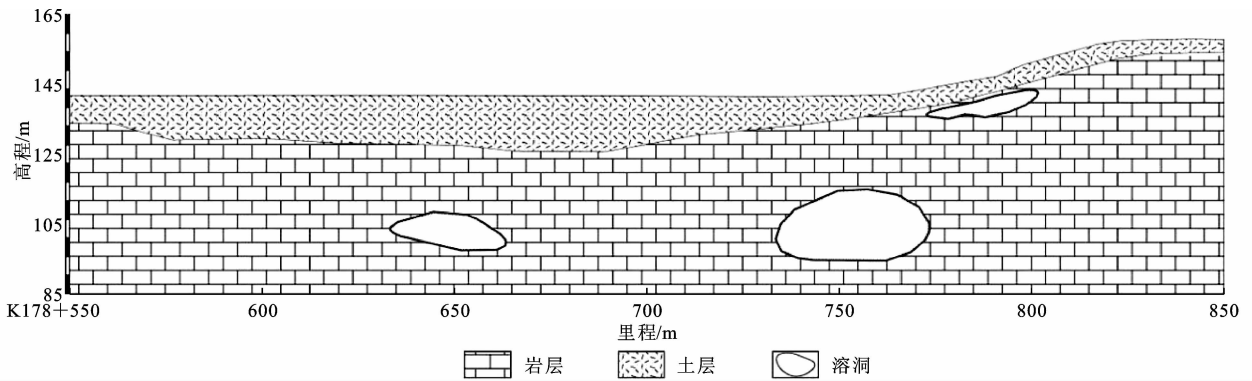


图 10 电阻率层析成像推断反演结果

Fig. 10 Resistivity tomography inferring inversion results

7 结 语

(1)根据厚跨比及填充与否,将溶洞划分为 4 种类型。发现:大跨度空溶洞有高阻异常的成像特征;大跨度填充溶洞兼有等值线向下弯折和低阻异常的特征;小跨度空溶洞有弱高阻的成像特征;小跨度填充溶洞主要呈现等值线向下弯折的特征。

(2)建立溶洞成像特征树图,并在工程实际中应用。发现:高阻异常和低阻异常主要出现于大跨度空溶洞和大跨度填充溶洞,而在小跨度空溶洞和小跨度填充溶洞中并不明显;等值线弯折必然存在于填充型溶洞,且经常伴随低阻异常出现。

(3)在均匀空间中同时存在高阻介质和低阻介质的情况下,等值线总是倾向于向低阻介质靠拢,从

而产生等值线弯折的现象。与此同时,由于电阻率等值线聚集于低阻介质附近,其延伸受到很大限制,从而产生低阻屏蔽效应。

(4)在溶洞跨度较大的情况下,成像特征主要表现为高阻异常和低阻异常,解释推断较为简单;但在溶洞跨度较小的情况下,由于低阻效应的存在,高阻介质(空溶洞或较薄的溶洞顶板)经常被遮盖,这为解释推断带来较大困难。因此,下一步需加强小跨度溶洞成像特征的研究。

参考文献:

References:

- [1] 陈宏峰,张发旺,何 愿,等.地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J].水文地质工程地质,2016,43

- (5):42-47.
- CHEN Hong-feng, ZHANG Fa-wang, HE Yuan, et al. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for karst systems[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2016, 43(5):42-47.
- [2] 沈志平,孙 洪,吴 斌,等.岩溶洼地地区典型地质灾害与防治对策建议[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(2):137-144.
- SHEN Zhi-ping, SUN Hong, WU Bin, et al. Study on typical geologic hazard in karst depressions and its countermeasures[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2):137-144.
- [3] 罗彩红,邢 健,郭 蕾,等.基于井间电磁 CT 探测的岩溶空间分布特征[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增1):669-673.
- LUO Cai-hong, XING Jian, GUO Lei, et al. Spatial distribution characteristics of karst based on cross hole electromagnetic computerized tomography technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1):669-673.
- [4] GUTIERREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138:61-88.
- [5] 刘秀敏,陈从新,沈 强,等.覆盖型岩溶塌陷的空间预测与评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9):2785-2790.
- LIU Xiu-min, CHEN Cong-xin, SHEN Qiang, et al. Spatial prediction and evaluation of collapse of covered karst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9):2785-2790.
- [6] 杨天春,许德根,张 启,等.高密度电法在隐伏溶洞勘探中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(2):145-148.
- YANG Tian-chun, XU De-gen, ZHANG Qi, et al. Application of high density resistivity method in engineering karst exploration[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2):145-148.
- [7] 郭栋栋,赵俐红,高宗军.山东泰安羊娄岩溶地面塌陷的高密度电法探测应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(4):104-108.
- GUO Dong-dong, ZHAO Li-hong, GAO Zong-jun. Prospecting research of high density electrical method about karst ground collapse in Yanglou, Tai'an City Shandong Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(4):104-108.
- [8] 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*, 2016, 35(6):699-705.
- ZHOU Wen-long, WU Rong-xin, XIAO Yu-lin. Back analysis of high density resistivity method in the water-bearing karst cave[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(6):699-705.
- [9] CARRIÈRE S D, CHALIKAKIS K, SENECHAL G, et al. Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study geological structuring of karst unsaturated zone[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 94(4):31-41.
- [10] PARK M K, PARK S, YI M J, et al. Application of electrical resistivity tomography (ERT) technique to detect underground cavities in a karst area of South Korea[J]. *Environmental Earth sciences*, 2014, 71(6):2797-2806.
- [11] AKIYAMA S, HATTANJI T, MATSUSHI Y, et al. Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography[J]. *Geomorphology*, 2015, 247:2-9.
- [12] REDHAOUNIA B, ILONDO B O, GABTNI H, et al. Electrical resistivity tomography (ERT) applied to karst carbonate aquifers: Case study from Amdoun, Northwestern Tunisia[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2015, 173(4):1289-1303.
- [13] FESTA V, TRIPALDI S, SINISCALCHI A, et al. Geoelectrical resistivity variations and lithological composition in coastal gypsum rocks: A case study from the Lesina Marina area (Apulia, southern Italy) [J]. *Engineering Geology*, 2016, 202:163-175.
- [14] MCCORMACK T, O'CONNELL Y, DALY E, et al. Characterisation of karst hydrogeology in Western Ireland using geophysical and hydraulic modelling techniques[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 10:1-17.
- [15] BERMEJO L, ORTEGA A I, GUERIN R, et al. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra De Atapuerca, Burgos, Spain) [J]. *Quaternary International*, 2017, 433:393-401.
- [16] 魏 锋,陈忠达,陈峙峰,等.路堤下伏溶洞受力模式和变形破坏的数值模拟[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(6):195-206.
- WEI Feng, CHEN Zhong-da, CHEN Zhi-feng, et al. Numerical simulation of the mechanical characteristic and failure mode of karst subgrade[J]. *China Journal*

- of Highway and Transport, 2018, 31(6):195-206.
- [17] ZHANG Z, CHEN Z D, ZHU Y T, et al. Numerical research on the capacity of underground excavation to bear subgrade construction [J]. Indian Geotechnical Journal, 2018, 43(3):564-574.
- [18] 张震, 陈忠达, 朱耀庭, 等. 地应力对路基下伏溶洞稳定性的影响 [J]. 岩土力学, 2016, 37(增2):715-723.
ZHANG Zhen, CHEN Zhong-da, ZHU Yao-ting, et al. Effect of in-situ stress on stability of underlying karst cave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):715-723.
- [19] 赵明华, 唐威力, 肖尧, 等. 考虑厚跨比的基桩下伏溶洞顶板冲切特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39(4):1159-1167.
ZHAO Ming-hua, TANG Xian-li, XIAO Yao, et al. Model tests on punching properties of karst cave roof under pile tip considering different thick-span ratios [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4):1159-1167.
- [20] 雷勇, 刘一新, 邓加政, 等. 冲切破坏模式下溶洞顶板极限承载力计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9):2162-2169.
LEI Yong, LIU Yi-xin, DENG Jia-zheng, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of cave roof under punching failure mode [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9):2162-2169.
- [21] 龚术, 张智. 高密度电阻率法在高速公路不良地质体勘探中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(6):765-774.
GONG Shu, ZHANG Zhi. The application of high density resistivity method to prospecting defective geological bodies of highways [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(6):765-774.
- [22] 孟陆波, 李天斌, 段铮. 隧道超前地质预报中不良地质体的瞬变电磁响应特征 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6):69-75.
MENG Lu-bo, LI Tian-bin, DUAN Zheng. Transient electromagnetic response features of unfavorable geological body in tunnel geological prediction [J]. Chinese Railway Science, 2011, 32(6):69-75.
- [23] 龚惠民, 马瑞华, 段建华. 瞬变电磁在资料解释中如何消除低阻屏蔽 [J]. 中国煤炭地质, 2007, 19(增2):126-127.
GONG Hui-min, MA Rui-hua, DUAN Jian-hua. Elimination of low resistivity shielding in TEM data interpretation [J]. Coal Geology of China, 2007, 19(S2):126-127.
- [24] 石显新, 闫述, 傅君眉, 等. 瞬变电磁场探测中低阻屏蔽层影响的时-频分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(2):51-54.
SHI Xian-xin, YAN Shu, FU Jun-mei, et al. Time-frequency analysis on influence of low resistive shielding layer in the exploration of transient electromagnetic field [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(2):51-54.
- [25] 胡兵, 于景邨, 刘振庆, 等. 矿井瞬变电磁法探测中低阻屏蔽层影响物理模拟研究 [J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6):661-666.
HU Bing, YU Jing-cun, LIU Zhen-qing, et al. Physical simulation study on low resistive shielding layer of mine transient electromagnetic detecting [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(6):661-666.