

陈丰毅, 潘剑伟, 宋宏明, 等. 跨孔电磁波 CT 法在不同工作模式下对小型溶洞的分辨能力研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 340-350.  
DOI: 10.11932/karst20250211

# 跨孔电磁波 CT 法在不同工作模式下 对小型溶洞的分辨能力研究

陈丰毅<sup>1</sup>, 潘剑伟<sup>2,3</sup>, 宋宏明<sup>1</sup>, 杨晨<sup>2</sup>, 槐玉鹿<sup>2</sup>

(1. 中国建筑材料工业地质勘查中心广西总队, 广西桂林 541002; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 3. 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)

**摘要:** 跨孔电磁波 CT 法是一种原位无损的探测方法, 因其具有较高的分辨率及施工效率, 能够直观、清晰地反映出地下局部异常体的空间分布, 被广泛应用于溶洞探测、路基注浆质量检测等领域。但目前关于该方法对小型溶洞分辨能力的影响因素研究并不多见。文章利用电磁波数值模拟系统和自编添加电磁噪声程序, 通过控制变量的方法分别对不同介质吸收系数、不同定点距、孔间距工作模式情况下, 研究了电磁波 CT 法对小型溶洞探测的分辨能力。结果表明, 围岩与探测目标体的吸收系数差异越大, 越有利于电磁波 CT 法对异常体的分辨, 但该过程也受环境电磁噪声干扰的影响。随着环境电磁噪声干扰的增强, CT 成像的分辨能力会明显降低; 定点距越大方法的分辨能力也降低。对小型溶洞进行探测时, 为确保成像的精度, 建议定点间距最好不要超过 4 m; 过大的钻孔间距会降低电磁波 CT 法对小型溶洞的分辨能力, 数值模拟结果表明, 利用 CT 法对小型溶洞进行探测时, 钻孔间距一般不要超过 30 m。

**关键词:** 电磁波 CT; 分辨能力; 吸收系数; 小型溶洞

**创新点:** 通过数值模拟和自编电磁噪声程序, 系统研究了跨孔电磁波 CT 法对小型溶洞的分辨能力, 揭示了吸收系数差异、环境噪声、定点距和孔间距的影响规律, 并提出定量优化参数, 为工程探测提供了可靠依据。

**中图分类号:** P631; P642.25 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2025)02-0340-11

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

中国岩溶分布广泛, 约占全球岩溶总面积的 15.6%, 以西南地区尤为发育<sup>[1]</sup>。岩溶区地质条件复杂, 溶洞、破碎带等不良地质条件发育且分布不均, 给区内工程施工带来极大安全隐患<sup>[2-3]</sup>。为确保施工安全, 需探测地下隐伏岩溶的规模及其分布<sup>[4-5]</sup>。

因此, 如何高效、精准开展岩溶勘查工作已成为亟需解决的重要课题。

作为常用的岩溶勘探方法之一的电磁波 CT (Computerized Tomography, 缩写为 CT) 法是探测地下介质电磁波特性的一种地球物理方法<sup>[6]</sup>。与测井法和钻探法相比, 电磁波 CT 法的探测范围更广, 且能够直观、精确地查明隐伏岩溶的分布位置、形状

基金项目: 贵州省科技计划项目([2020]1Y173); 国家自然科学基金青年基金项目(42004122)

第一作者简介: 陈丰毅(1992—), 男, 工程师, 主要从事工程与环境地球物理方面的研究。E-mail: 229605052@qq.com。

通信作者: 潘剑伟(1988—), 男, 副教授, 主要从事电磁勘探方法的教学和研究工作。E-mail: jwpan@gzu.edu.cn。

收稿日期: 2023-09-23

大小与性质等信息,同时也是一种原位无损的检测方法<sup>[7-8]</sup>。电磁波 CT 法的观测工作主要在地下进行,不仅分辨率高、工作效率高,还不受地形限制,特别是在当覆盖层较厚或者地面有障碍物阻挡时能够更好地发挥其优势,在岩溶探测领域展现出极大的发展潜力。

早在 1923 年,苏联就开展了对井间、井与坑道之间的电磁波观测等试验,而后在 20 世纪 70 年代中期,由美国学者 Lytle 等<sup>[9]</sup>提出电磁波层析技术应用方法,并将其运用到井间勘探中,推动了电磁波层析技术在地球物理领域内的发展。我国于 1959 年开始对地下层析成像方法进行研究,并将其应用于寻找盲矿体的探测试验,后来该项技术被越发重视,并不断在各个方面得到完善和发展<sup>[10]</sup>。胡熠<sup>[11]</sup>、郑立宁等<sup>[12]</sup>通过对比岩溶路基注浆前后电磁波吸收系数的差别对注浆质量进行判定,结果表明,电磁波 CT 法能够很好地圈定水泥浆液在地下介质中的分布形态,为今后该方法应用于岩溶路基注浆质量检测提供了一定的依据。陈杭等<sup>[13]</sup>、赵旭辰等<sup>[14]</sup>将电磁波 CT 法用于探测煤矿采空区,并根据电磁波吸收系数差异来判断采空区的分布情况,取得了较好的应用效果。Tan 等<sup>[15]</sup>通过场地试验来验证电磁波 CT 在岩溶勘探中的有效性,并准确探测出了溶洞的形状、位置和填充物形态。黄生根等<sup>[16]</sup>利用 CT 技术对溶洞模型进行模拟,将得到的结论对实际工程试验数据进行判断和解释,得到了与勘察资料相同的结论,验证了模拟结果的准确性。代方园等<sup>[17]</sup>综合利用瞬变电磁法及电磁波 CT 法对小型溶洞的分布边界进行精细定位,并通过钻孔验证其结果与电磁波 CT 成像吻合,证实了电磁波 CT 法对小型岩溶探测的有效性。

虽然电磁波 CT 理论成熟、应用范围广,但其最终成像质量不仅受工区地质条件、仪器信噪比等客观因素影响,还与采集参数选取、数据处理方法及解释人员经验等主观因素密切相关<sup>[18]</sup>。在不同工作环境、模式下,电磁波 CT 对异常体的分辨能力仍会受不同因素的影响<sup>[19]</sup>。而现有研究中对于该方法分辨能力的相关探讨较少,为此,本文利用中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司研发的井间电磁波层析成像处理模拟系统和自编程序,通过控制变量的方法分别建立了在不同介质吸收系数、不同定点距、孔间距情况下的探测模型,研究不同模型下电磁波

层析成像对小型溶洞的分辨能力。

## 1 电磁波 CT 法原理

电磁波 CT 法(以下简称 CT)是一种高频电磁波法,利用在一井孔中的发射机向地下介质发射电磁波(工作频率 0.5~32.0 MHz),并在另一井孔内放置接收天线接收被介质吸收衰减后的电磁波信号,利用不同介质对电磁波吸收程度差异来推断地下介质赋存特征的探测方法<sup>[20-21]</sup>,工作原理见图 1。

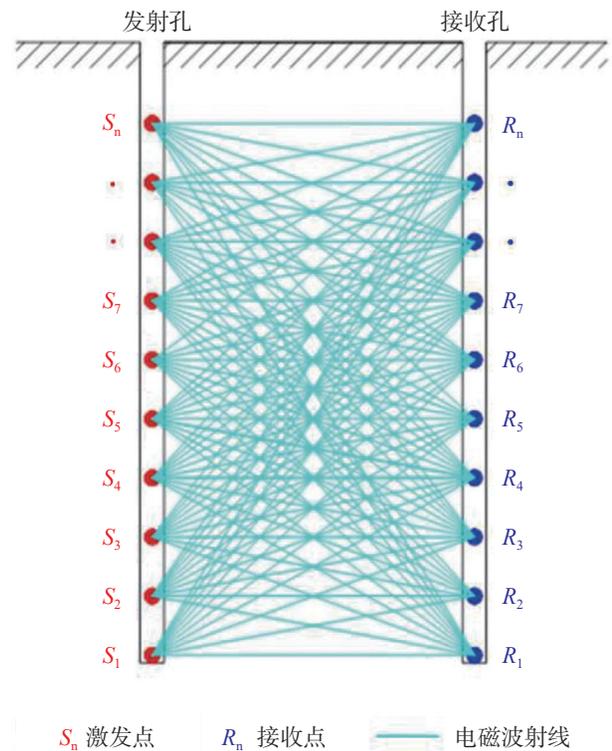


图 1 电磁波 CT 法观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic wave CT observation system

根据电磁波理论,得出电磁波 CT 法中场强的观测公式为<sup>[22]</sup>:

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

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

式中:  $E$  为接收点的场强值;  $E_0$  为初始辐射场强;  $\beta$  为吸收系数,即介质中单位距离对电磁波的吸收值;  $r$  为发射点至接收点的距离;  $f(\theta)$  为收发天线的方向因子函数;  $\omega$  为天线圆频率;  $\mu$  为磁导率;  $\varepsilon$  为介电常数;

$K$ 为电导率。

理论研究和实践检验表明,地下介质吸收电磁波能量,且在不同的地下介质(如不同的岩石、破碎带,充水溶洞,良导矿体等)中其吸收系数不同,将造成不同介质吸收的电磁波能量存在差异,即导致电磁波射线通过介质后的衰减程度不同,在导电性较好的地下介质中,吸收系数较大,场强衰减较快,相反,在导电性较差的地下介质中,场强衰减的强度则相对较慢,电磁波 CT 法正是利用介质对电磁波的吸收差异来推断地下异常体的赋存状态<sup>[23]</sup>。

## 2 数值模拟及其结果分析

为讨论不同工作模式下电磁波 CT 法对小型溶洞的分辨能力,笔者首先进行数值模拟研究。本次建模是利用井间电磁波层析成像处理软件和自编的电磁噪声添加程序完成的,正演模型示意图如图 2。介质 1 为灰岩或白云岩;介质 2 为具有不同物性充填的溶洞。在正演过程中主要通过调整介质 1 和介质 2 的吸收系数、发射机定点距及两个钻孔之间的距离来获得对应情况下的理论响应信号。然后,在响应信号中加入一定幅值的随机电磁噪声,并对加噪后的正演模型进行反演成像,从而实现不同吸收系数介质、不同定点距和不同孔间距工作模式下 CT 法探测小溶洞分辨效果的评价。

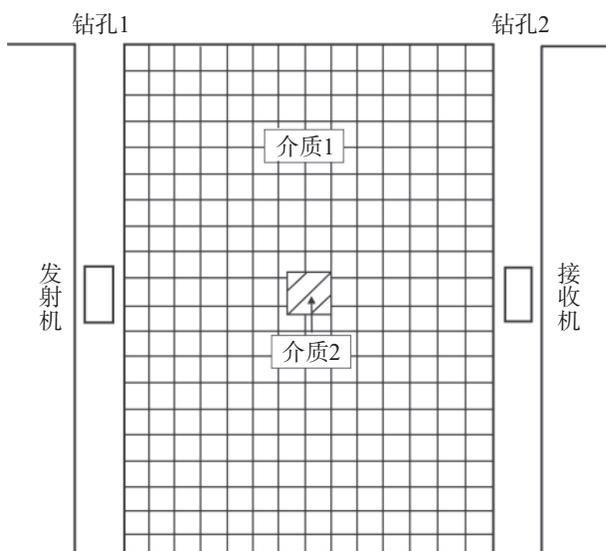


图 2 正演模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the forward modeling

### 2.1 目标体与围岩的吸收系数差异对分辨能力影响的研究

由电磁波理论可知,吸收系数是反映介质电磁波特性的参数,且探测目标体与周围介质间的吸收系数差异会影响 CT 的分辨能力。为研究这种影响规律,在其它参数不变的情况下,分别设置了 6 组不同吸收系数差异的数值模型,并对其进行反演成像。将背景(围岩)环境吸收系数设定为  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 探测目标体的吸收系数分别设定为  $0.2 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.7 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。其中探测目标体设为一边长为  $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$  的矩形,分布在两孔中间位置且深度为  $30 \text{ m}$  处,以此模拟地质工程中常见的一些小型溶洞,左右两侧钻孔深度均为  $60 \text{ m}$ (图 2)。此外,为了更好地模拟真实的探测情况,在模型中分别添加了 1%、2%、3% 的 3 种电磁噪声干扰,之后进行反演成像。选取介质 2 吸收系数分别为  $0.2 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.7 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时的反演成像结果进行图件绘制,结果如图 3。

图 3a、图 3b、图 3c 为围岩吸收系数为  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 探测目标体吸收系数为  $0.2 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时,三种电磁噪声干扰模型的反演结果。从图 3 可知,仅 1% 的噪声干扰时,能在  $30 \text{ m}$  处隐约分辨出一个高吸收系数的异常体(图 3a);而当噪声为 2% 后,模型反演成像所得的剖面内吸收系数分布散乱(图 3b);当噪声为 3% 后,原来设置溶洞模型的位置,已经无法分辨出异常体的存在(图 3c)。当将目标体吸收系数提高至  $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ (即与背景吸收系数相差  $0.3 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时得出的情况)进行反演,结果如图 3d、图 3e、图 3f。由图可知,在环境噪声为 1% 和 2% 的情况下,反演剖面均能较清晰地分辨出目标体位置。仅当噪声增大至 3% 时,在目标体位置异常才开始变得模糊。继续将吸收系数差异增加到  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ (图 3g、图 3h、图 3i),在三种噪声干扰水平下,电磁波 CT 均能够很好地识别出目标的存在。

通过以上模拟结果可知,当周围环境与探测目标体的吸收系数有明显的差异时,电磁波 CT 法才能更好地识别出目标体,且两者差异越大,其探测成像结果的分辨程度越好。另外,噪声干扰也是影响电磁波 CT 成像结果的重要因素之一,噪声干扰越大,CT 成像分辨能力相应越差。

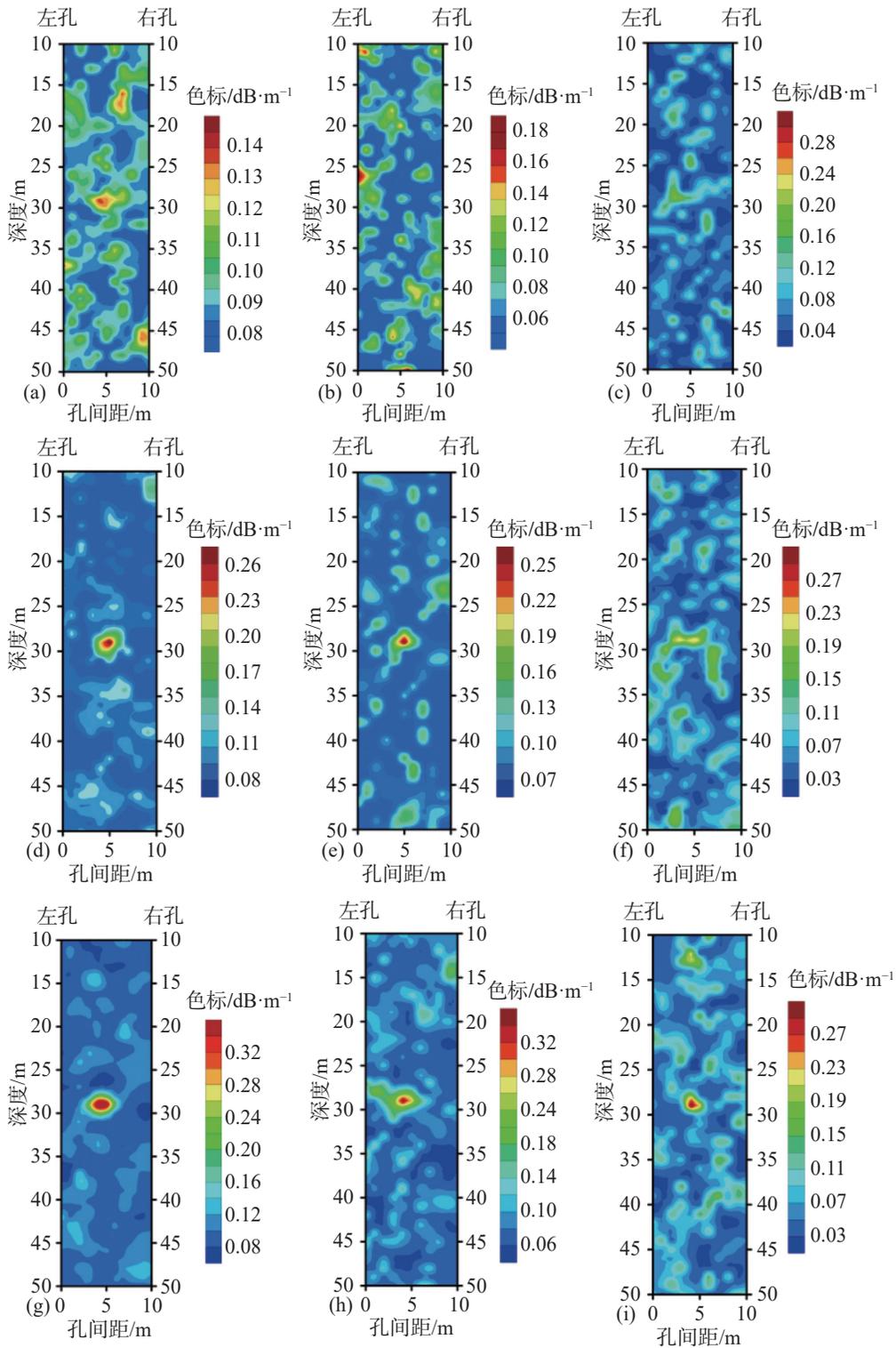


图 3 不同吸收系数差异及不同电磁噪声干扰情况下的电磁波 CT 法的反演成像图

(a)、(b)、(c) 吸收系数差异为  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ ，电磁噪声分别为 1%、2%、3% (d)、(e)、(f) 吸收系数差异为  $0.3 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ ，电磁噪声分别为 1%、2%、3% (g)、(h)、(i) 吸收系数差异为  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ ，电磁噪声分别为 1%、2%、3%

Fig. 3 Inversion results of electromagnetic wave CT method under different absorption coefficients and noise disturbances

(a) The difference in absorption coefficients for (b) and (c) is  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , while the difference in absorption coefficients for electromagnetic noise is 1%, 2%, and 3%, respectively. The difference in absorption coefficients for (d), (e), and (f) is  $0.3 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , while the difference in absorption coefficients for electromagnetic noise is 1%, 2%, and 3%, respectively. The difference in absorption coefficients for electromagnetic noise is  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , and the difference in absorption coefficients for electromagnetic noise is 1%, 2%, and 3%, respectively

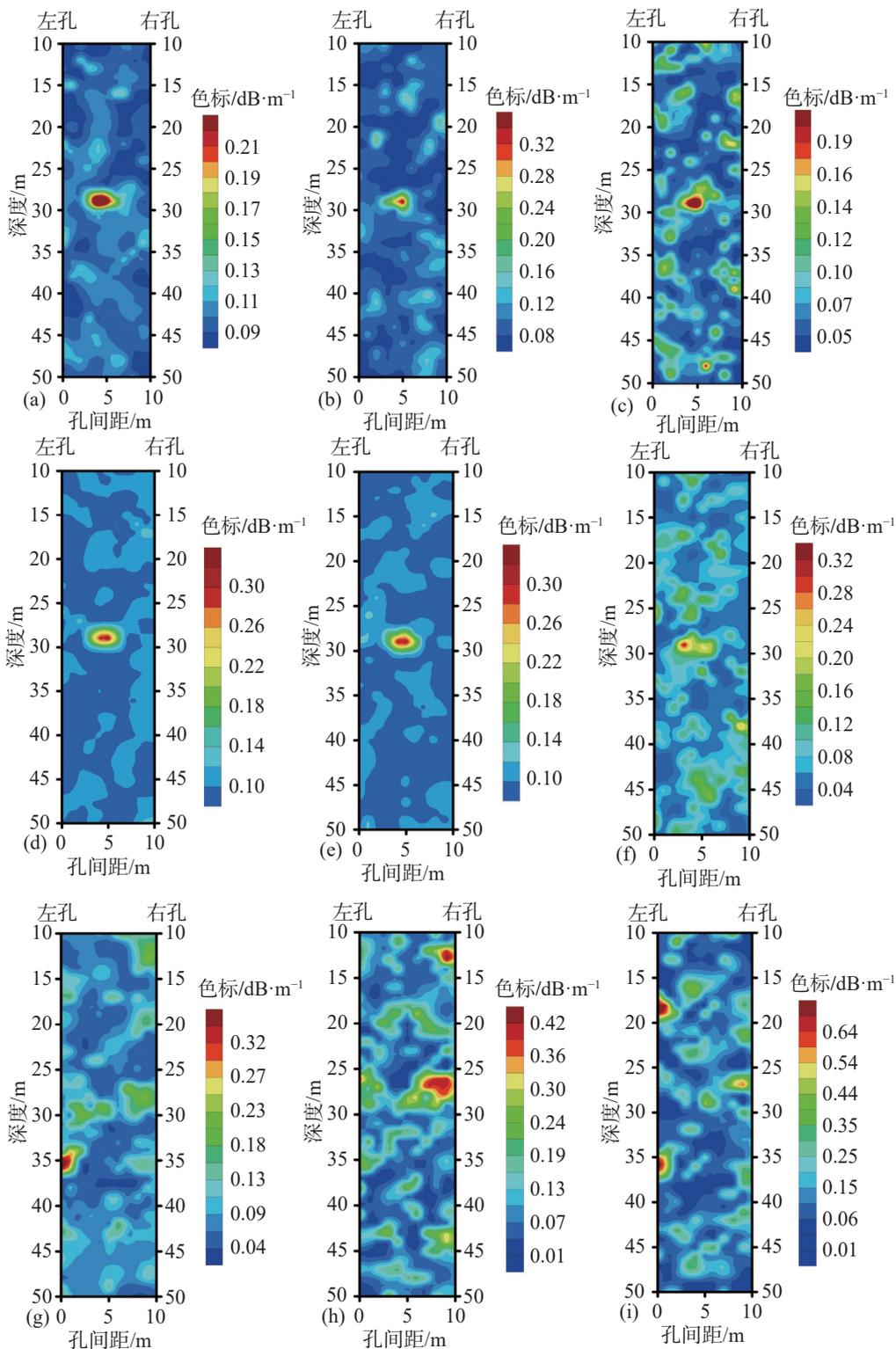


图4 不同定点距及不同噪声干扰情况下电磁波CT法的反演成像图

(a)、(b)、(c) 定点距为 1 m, 噪声干扰分别为 1%、2%、3% (d)、(e)、(f) 定点距为 4 m, 噪声干扰分别为 1%、2%、3% (g)、(h)、(i) 定点间距为 8 m, 噪声干扰分别为 1%、2%、3%

Fig. 4 Inversion results of electromagnetic wave CT method under different transmitting spacings and noise disturbances

(a) The fixed-point distance for (b) and (c) is 1 m, and the noise interference is 1%, 2%, and 3%, respectively. The fixed-point distance for (d), (e), and (f) is 4 m, and the noise interference is 1%, 2%, and 3%, respectively. The fixed-point distance for (g), (h), and (i) is 8 m, and the noise interference is 1%, 2%, and 3%, respectively

## 2.2 不同定点距工作模式对成像分辨率影响的研究

本文在讨论定点距对成像效果的影响时, 将背景的吸收系数设定为  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。在孔间距为 10 m 的两个钻孔中间位置, 深度为 30 m 处设置一个  $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$  的矩形异常体用以模拟溶洞, 其吸收系数设定为  $0.6 \text{ dB}/\text{m}$ 。讨论了接收点距为 1 m, 发射的定点距分别为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、8 m、10 m 时, 电磁波 CT 法在 1%、2% 和 3% 噪声干扰下的反演成像情况, 并选取定点距为 1 m、4 m、8 m 的结果绘制断面图像(图 4)。

图 4a、图 4b、图 4c 是定点距为 1 m 时, 添加三组噪声干扰后得到的反演成像结果。由图可知, 在 3 种噪声情况下, 图中溶洞位置处均出现一处明显异常。而将定点间距增加到 4 m 时, 随着发射-接收射线覆盖密度降低, 电磁波 CT 对异常体的分辨效果开始下降。在 1% 和 2% 噪声水平情况下尚能分辨出设置的溶洞异常(图 4d、图 4e), 但噪声增大到 3% 时(图 4f), 在剖面中已经不能完全识别出溶洞所处的位置。而当定点距增大到 8 m 时, 随着射线数量进一步减少, 其噪声无论为 1%、2% 还是 3%, 其反演结果中吸收系数均表现出明显的无规则分布(图 4g、图 4h、图 4i), 此时, 从图像中均无法识别出溶洞所在的位置。

从上述模拟结果可知, 随着定点距的增大, 电磁波 CT 法反演成像对异常体分辨能力有明显下降。当定点间距过大时, 其在工作的过程中射线数变稀, 采集的数据量相应减少, 致使电磁波 CT 分辨能力降低。针对本次模拟探测的  $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$  规模的溶洞, 当岩石背景与溶洞的吸收系数差异不超过  $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时, 若要准确圈定溶洞的位置、范围, 其定点间距不宜超过 4 m。

## 2.3 不同孔间距工作模式下对成像分辨率影响的研究

讨论孔间距对 CT 法分辨率效果的影响, 其实主要讨论的是仪器在有噪声环境下的极限分辨能力。因此, 与前述噪声加入方式不同, 在正演完成之后, 往理论信号中加入的是与城市工程背景噪声相应的幅值在 50~100 dB 的随机电磁噪声进行反演成像。在模拟过程中采用与前述实验相同的溶洞模型, 并将围岩的吸收系数设置为  $0.8 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 点距设置为 1 m。讨论了围岩与异常体吸收系数差异分别为

$0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 孔间距在 10 m、20 m、30 m 时的电磁波 CT 法的极限分辨率, 模拟结果如图 5 所示。

由图 5a、图 5b、图 5c 可知, 在正常背景噪声下, 当溶洞充填介质与围岩间存在较大吸收系数差异时(本例中超过  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ ), 孔间距在超过 30 m 时仍能得到较好的分辨效果, 在对应位置处能出现明显的异常, 电磁波 CT 法都能够很好地反映出模拟溶洞的位置。但是, 随着吸收系数之间差异的减小, 例如, 围岩也存在一定的溶蚀, 其吸收系数达到  $0.3 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时, 由于与异常体之间吸收系数差异减小到  $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ (图 5d, 图 5e, 图 5f), 孔间距为 10 m 和 20 m 时, 溶洞在反演剖面上还能得到较好的反应。但当孔间距达到 30 m 时, 溶洞引起的异常在反演剖面中已开始变得模糊。如果围岩与模拟溶洞的吸收系数差异继续缩小, 仅为  $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  时(图 5g, 图 5h, 图 5i), 在孔间距为 30 m 情况下, 其反演结果已不能完全识别出溶洞的位置。

从以上不同孔间距及不同吸收系数差异下的模拟反演结果来看, 当吸收系数差异一定时, 随着孔间距的增大, 其成像分辨率随之降低。当吸收系数差异较大时, 如溶洞中充填有地下水时, 在 30 m 以内的孔间距均能很好的成像。而当其吸收系数差异减小, 例如溶洞内充填碎石、黏土后又重新固结等情况, 对于 2 m 左右规模的溶洞, 如果孔间距太大, 电磁波 CT 则无法有效地识别出溶洞异常体。结合本模拟结果和实践经验, 电磁波 CT 法在工作时孔间距一般不能超过 30 m。

## 3 工程案例

通过上述正、反演模拟计算, 研究了电磁波 CT 在不同孔间距、定点距、吸收系数条件下对溶洞探测的分辨能力, 但在实际工程应用中地质体的情况未知且通常更为复杂, 为研究模拟试验结论对电磁波 CT 实测结果分析的准确性, 在特选定某岩溶发育工区进行了实际测量。

案例通过电磁波 CT 法对广西靖那路附近某溶洞发育处进行探测, 采用中国地质科学院物化探所生产的 JW-5A 型仪器进行 CT 数据采集。将定点距设置为 1.0 m, 接收点距设置为 0.5 m, 接收扇区范围控制在 1.5 倍孔距左右以避免绕射波干扰。采用

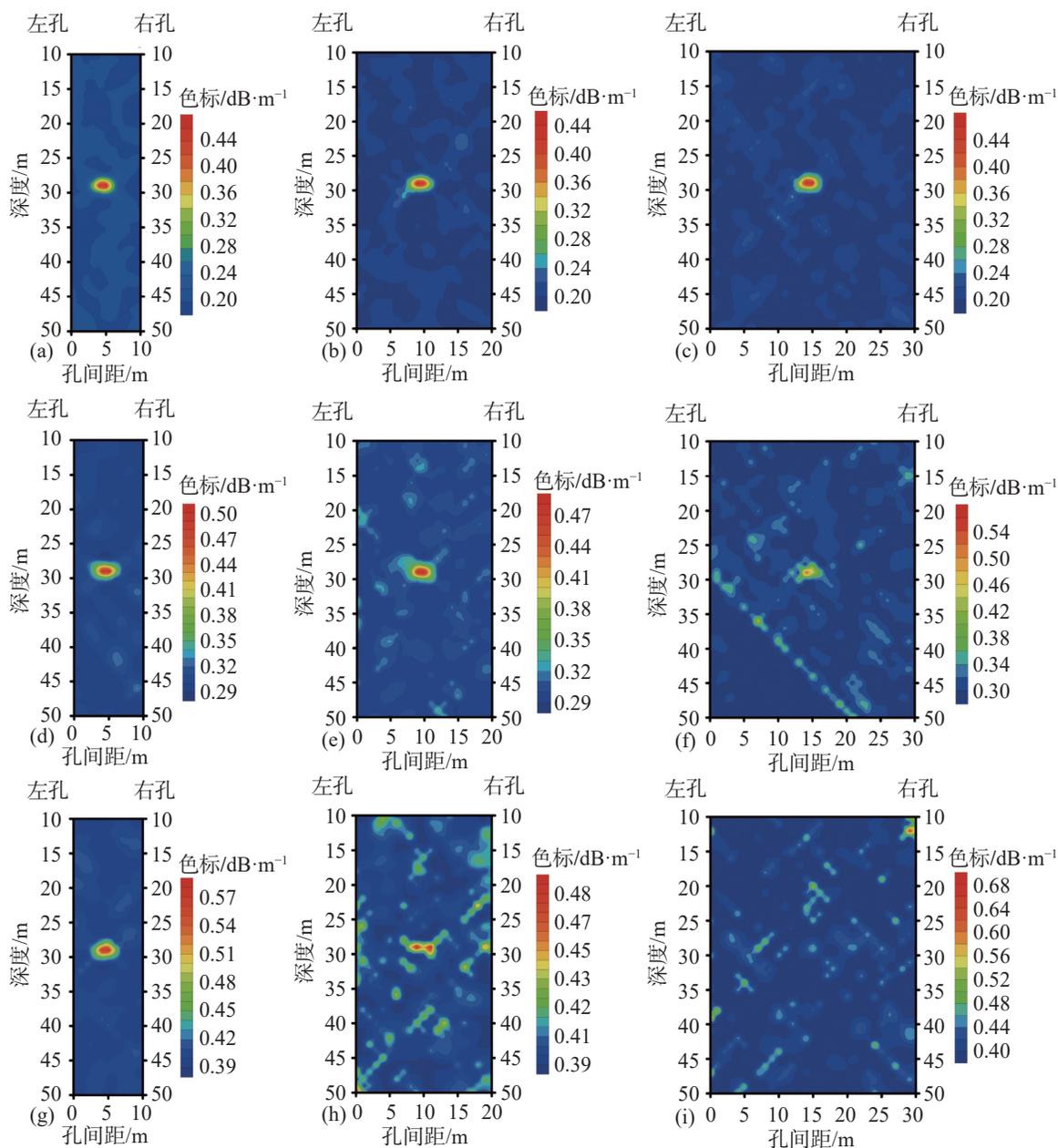


图 5 不同孔间距及不同吸收系数差异下电磁波 CT 法的反演结果成像图

(a)、(b)、(c) 吸收系数差异为  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 孔间距分别为 10 m、20 m、30 m (d)、(e)、(f) 吸收系数差异为  $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 孔间距分别为 10 m、20 m、30 m (g)、(h)、(i) 吸收系数差异为  $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , 孔间距分别为 10 m、20 m、30 m

Fig. 5 Inversion results of electromagnetic wave CT method under different borehole spacings and absorption coefficients

(a) The difference in absorption coefficients between (b) and (c) is  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , with hole spacing of 10 m, 20 m, and 30 m, respectively. The difference in absorption coefficients between (d), (e), and (f) is  $0.5 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , with hole spacing of 10 m, 20 m, and 30 m, respectively. The difference in absorption coefficients between (g), (h), and (i) is  $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , with hole spacing of 10 m, 20 m, and 30 m, respectively

12 MHz、16 MHz、20 MHz、24 MHz 等 4 个频率段进行扫频采集, 由于研究区溶洞发育, 电磁波吸收大, 故分析频率主要选取 20 MHz、24 MHz。其中, ZK01-ZK02 的孔间距为 14 m。利用现场采集到的测试数据经专用软件对数据进行预处理和吸收系数的反演计算后, 即分别得到 20 MHz(图 6a)、24 MHz(图 6b)

频率下的电磁波 CT 反演吸收系数断面图。由前述模拟实验结论可知, 当吸收系数越大时, 表明地下介质的完整性越差, 有可能为溶洞发育区域。而当吸收系数越小时, 表明地下介质的完整性越好, 溶洞发育可能性越低。以此直观地反映地下溶洞存在的深度及分布范围、规模和形态等。

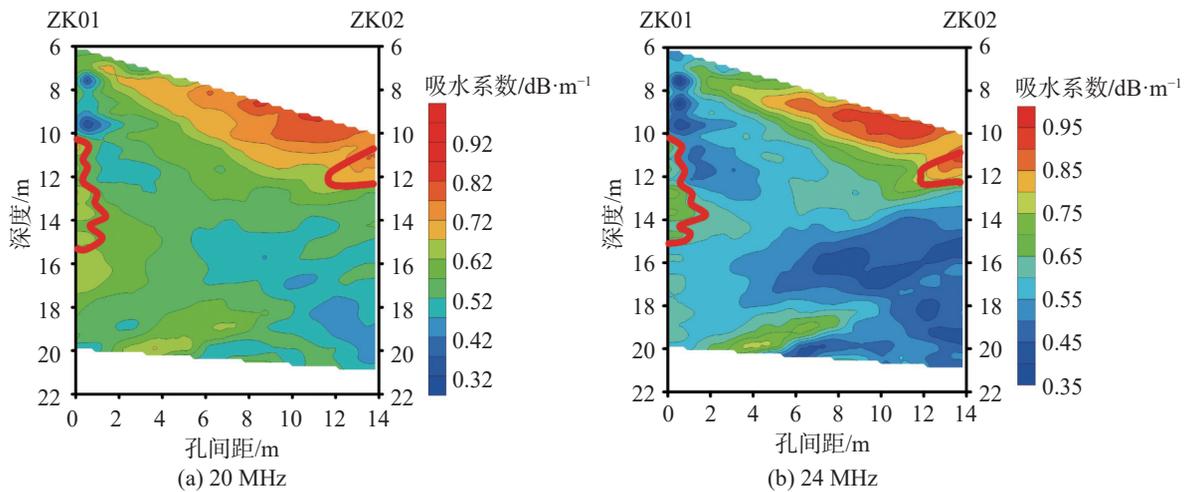


图 6 不同频率下电磁波 CT 反演吸收系数断面图

Fig. 6 Cross-sectional diagram of absorption coefficient inversion by electromagnetic wave CT at different frequencies

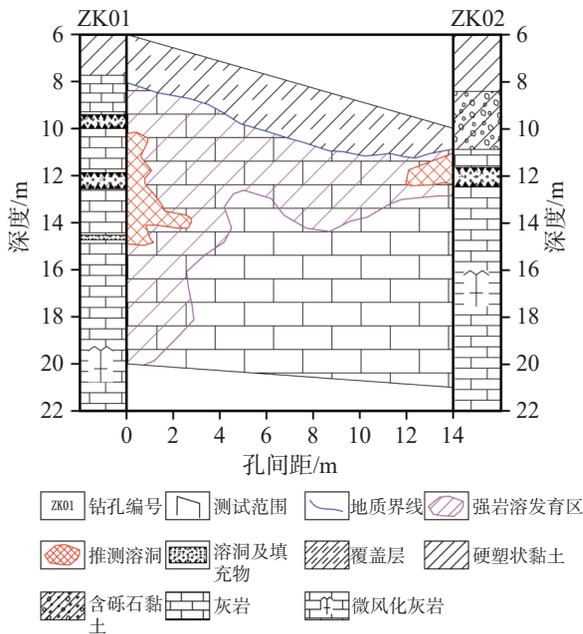


图 7 电磁波 CT 推断地质断面及钻孔柱状图

Fig. 7 Electromagnetic CT inferred geological section and borehole histogram

由图 6a、图 6b 可知,两钻孔间的高吸收系数异常区均集中在浅部,且呈近层状分布,推测其为表层的覆盖层。其中在 ZK01 深度 10.2~15.1 m 范围内,在 20 MHz、24 MHz 两种频率下均有高吸收系数异常分布,结合模拟实验结论推测其为溶洞发育区。同样,ZK02 在两种频率的反演下,在其 11.5~12.2 m 深度范围内,均有吸收系数高值异常区,推测为溶洞发育区。随着钻孔深度增加,其吸收系数相对较小,推测其为完整性较好的基岩。基于反演结果分析绘

制如图 7 所示的电磁波 CT 推断地质断面及钻孔柱状图,通过对比钻孔岩性资料验证了 CT 结果的准确性。由图 7 可知,ZK01、ZK02 分别于 9.3~14.7 m、11.6~12.4 m 深度范围内揭露了溶洞,该结论与图 6 推测的溶洞发育部位相吻合,说明电磁波 CT 法探测结果与钻孔的揭露结果是一致的,验证了物理模拟结论的准确性。

### 4 结 论

(1)在其他参数不变时,吸收系数越高,电磁波 CT 对异常体的分辨能力越强。加入噪声后,以 3% 噪声为界,当噪声高于 3% 时 CT 图像对异常体分辨率出现降低,但高吸收系数能够减弱噪声带来的影响。

(2)随定点距增加,电磁波 CT 接收发射覆盖密度降低,反演图像对异常体的分辨能力显著下降,且噪声对分辨率的影响更为显著,因此定点距选取需结合吸收系数差异情况确定。

(3)在其他条件一定时,过大的孔间距,会降低电磁波 CT 法对小型溶洞的分辨能力。结合本次研究结果和实践经验,电磁波 CT 法想要分辨较小规模的溶洞,孔间距一般不要超过 30 m。

(4)工程案例表明,电磁波 CT 法在一定条件下可以准确探测出地下溶洞发育的赋存情况;同时根据吸收系数的相对大小可以反映出地下介质的完整性,从而得到溶洞的整体发育情况。

## 参考文献

- [1] 陈贻祥, 覃小群, 黄奇波, 甘伏平, 韩凯, 郑智杰, 贺德煌, 黄德健, 付昱, 蒋莹. 桂南陇瑞洼地浅层岩溶自然电场特征剖析[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 130-138.  
CHEN Yixiang, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, GAN Fuping, HAN Kai, ZHENG Zhijie, HE Dehuang, HUANG Dejian, FU Yu, JIANG Ying. Analysis of the characteristics of self-potential anomalous in shallow karst area of Longrui valley, southern Guangxi, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 130-138.
- [2] 刘天云, 罗锐恒, 胡顺强, 赵永宾, 潘晓东, 刘伟. 文山小河尾水库岩溶渗漏水文地质条件与管道位置识别[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 88-99.  
LIU Tianyun, LUO Ruiheng, HU Shunqiang, PAN Xiaodong, LIU Wei. Hydrogeological conditions of karst leakage and identification of pipeline location in Xiaohewei reservoir, Wenshan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 88-99.
- [3] 李志义, 白明洲, 许兆义, 陈祥, 王成亮, 郭蒙. 深长桩基础施工期岩溶处置实时效果无损检测方法研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(5): 91-96.  
LI Zhiyi, BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, CHEN Xiang, WANG Chengliang, GUO Meng. Study on Real-time NDT Method Applied in Evaluating the Performance of Karst Cave Treatment in the Course of Construction of Deep Bridge Piles Foundation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(5): 91-96.
- [4] Lapierre L, Zapata R, Lepinay P, et al. Karst exploration: Unconstrained attitude dynamic control for an AUV-Science Direct[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 219.
- [5] Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, Valois R, Bosch F. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview[J]. *Hydrogeology journal*, 2011, 19(6): 1169-1180.
- [6] 张银松, 曹聪, 康世海, 刘家富. 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.  
ZHANG Yinsong, CAO Cong, KANG Shihai, LIU Jiafu. Characteristics of hidden karst collapse in the Zhongliangshan area of Chongqing and an approach of geophysical surveys[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 918-927.
- [7] YI Hu, MENG Yizhao, SHU Liang. Research on detection standard of Karst Roadbed Grouting effect based on the Geophysical Methods[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3207(1118): 659-662.
- [8] HE Tuan, LI Guodong, LUO Feng. Research on Mining-Induced stress distribution of extrathick coal seams based on electromagnetic wave CT technology[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022.
- [9] 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.
- [10] 谢朋. 基于 SPAC 法和电磁波 CT 法探测城市地下岩溶结构的对比研究[D]. 北京: 中国地震局地震研究所, 2019.  
XIE Peng. Based on SPAC method and electromagnetic wave CT method comparative study on detecting urban karst [D]. Beijing: China Earthquake Administration, 2019.
- [11] 胡熠. 电磁波层析法在南广铁路岩溶路基注浆质量检测上的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
HU Yi. Application of electromagnetic tomography in grouting quality detection of carst subgrade in Nanning-Guangzhou railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [12] 郑立宁, 谢强, 胡熠, 徐飞飞, 任新红. 电磁波 CT 岩溶路基注浆质量检测试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(6): 71-75, 125.  
ZHENG Lining, XIE Qiang, HU Yi, XU Feifei, REN Xinhong. Test study of electromagnetic CT for detecting grouting effect of Karst roadbed[J]. *Hydrogeology and engineering geology*, 2010, 37(6): 71-75, 125.
- [13] 陈杭, 邢亚东, 邓超云. 跨孔电磁波 CT 在煤矿采空区探测中的应用探究[J]. *矿山测量*, 2022, 50(1): 21-23, 37.  
CHEN Hang, XING Yadong, DENG Chaoyun. Application of borehole electromagnetic wave CT in coal mine goaf detection[J]. *Mine Surveying*, 2022, 50(1): 21-23, 37.
- [14] 赵旭辰, 李雪健, 曹芳智, 雷晓东, 李晨, 韩宇达. 井间电磁波 CT 在煤矿采空区探测效果分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(4): 1088-1094.  
ZHAO Xuchen, LI Xuejian, CAO Fangzhi, LEI Xiaodong, LI Chen, HAN Yuda. An analysis of the detection effect of cross-well electromagnetic wave CT in coal mine goaf[J]. *geophysical and geochemical exploration*, 2021, 45(4): 1088-1094.
- [15] TAN Hanhua, HUANG Jiahui, Qi Shengwen. Application of cross-hole radar tomograph in karst Area[J]. *Environmental earth sciences*, 2012, 66(1): 355-362.
- [16] 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]. *Geotechnical mechanics*, 2018, 39(S1): 544-550.
- [17] 代方园, 高扬, 宿庆伟, 胡韬, 耿付强, 董亚楠. 瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶分布及形态特征的应用: 以山东省济南地区为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(2): 308-317, 328.  
DAI Fangyuan, GAO Yang, SU Qingwei, HU Tao, GENG Fuqiang, DONG Yanan. Application of transient electromagnetism and cross-hole CT imaging to detect karst distribution and morphological characteristics: A case study of Jinan, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 308-317, 328.
- [18] 袁永榜, 易洪春. 基于多频同步电磁波 CT 技术的煤层水力压裂范围探测试验[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(8): 51-57.  
YUAN Yongbang, YI Hongchun. Detection test of coal seam hydraulic fracturing range based on multi-frequency synchronous electromagnetic wave CT technology[J]. *Industrial*

- and mining automation, 2020, 46(8): 51-57.
- [19] 付晖. 电磁波 CT 在水利水电工程岩溶探测中的应用[J]. 人民长江, 2003(11): 26-27.  
FU Hui. Application of Electromagnetic Wave CT in Karst Exploration of Water Conservancy and Hydropower Engineering[J]. Yangtze River, 2003(11): 26-27.
- [20] 刘少虹, 潘俊锋, 秦子晗, 王书文, 张震, 高晓进, 李根. 基于电磁波 CT 探测的掘进工作面冲击危险性评价技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4093-4101.  
LIU Shaohong, PAN Junfeng, QIN Zihan, WANG Shuwen, ZHANG Zhen, LI Geng. Research on the risk assessment of rock burst of heading face based on electromagnetic wave CT detection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4093-4101.
- [21] YANG Zhen, CHANG Shuai, WU Xiang. Mining Safety Mechanisms Adopting CT Projection Matrix Measured by Electromagnetic Wave Imaging in a Longwall Panel[J]. Disaster Advances, 2013, 6: 144-153.
- [22] 刘少虹, 潘俊锋, 王洪涛, 唐忠义, 夏永学, 曹延福, 张晨阳. 基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 384-396.  
LIU Shaohong, PAN Junfeng, WANG Hongtao, TANG Zhongyi, XIA Yongxue, CAO Yanfu, ZHANG Chenyang. Electromagnetic wave CT evaluation method for rock burst hazard in near field based on rock burst start-up process[J]. Journal of Coal, 2019, 44(2): 384-396.
- [23] 邓小虎, 傅焰林. 跨孔电磁波层析成像在岩溶三维空间分布上的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2022, 31(1): 13-22.  
DENG Xiaohu, FU Yanlin. Application of Cross-hole Electromagnetic Wave Tomography in Three Dimensional Spatial Distribution of Karst[J]. CT theory and application, 2022, 31(1): 13-22.

## Research on the resolution of cross-hole electromagnetic wave CT method for small karst caves under different working patterns

CHEN Fengyi<sup>1</sup>, PAN Jianwei<sup>2,3</sup>, SONG Hongming<sup>1</sup>, YANG Chen<sup>2</sup>, KUI Yulu<sup>2</sup>

(1. Guangxi Branch of China Geological Exploration Center for Building Materials Industry, Guilin, Guangxi 541002, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract** The cross-hole electromagnetic wave CT method, as an in-situ and non-destructive geophysical exploration technology, utilizes the propagation characteristics of high-frequency electromagnetic waves between boreholes to intuitively reflect the spatial distribution of underground anomalies. With advantages such as high resolution, efficient operation, and minimal restrictions by surface topography, it has been widely applied in engineering fields such as karst cave detection, roadbed grouting quality assessment, and mined-out area investigation in coal mines. However, in practical applications, the imaging quality of the electromagnetic wave CT method is affected by multiple factors, particularly in the detection of small karst cavities, where resolution capacity is closely tied to the selection of working parameters. Currently, there is a lack of systematic studies on the resolution capability of this method for small cavities, which to some extent restricts its precise application under complex geological conditions. This study adopts a combined approach of numerical simulation and engineering validation to thoroughly investigate the resolving capability of the cross-hole electromagnetic wave CT method under different working configurations for detecting small karst cavities.

The research provides a solid theoretical foundation and technical reference for its practical engineering application. The research follows a technical route that integrates theoretical analysis, numerical modeling, and on-site testing. In terms of numerical simulation, a professional cross-hole electromagnetic tomography processing system was used along with a self-developed program for adding electromagnetic noise. Detection models were constructed under varying conditions, focusing on how key parameters—such as differences in medium absorption coefficients, transmission-reception spacing, and borehole spacing—affect the imaging outcome. The interference effects of ambient electromagnetic noise were also systematically analyzed. The model settings were designed to reflect typical engineering conditions. For example, the absorption coefficient of surrounding rock was set to  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , and that of the target body (representing the karst cavity) was varied between  $0.2 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  and  $0.7 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$  to simulate different filling conditions. The transmitting spacing ranged from 1 m to 10 m, and borehole spacing was controlled within 10 m

to 30 m, covering a comprehensive range of commonly encountered engineering parameters. Based on the forward modeling, random electromagnetic noise at levels of 1% to 3% was also added to better replicate real field environments. For the engineering validation phase, a typical karst-developed area near Jingna Road in Guangxi was selected for on-site testing, and the absorption coefficient cross-sections were compared against borehole data for verification.

The research results indicate that the resolution capability of electromagnetic wave CT for small karst cavities shows strong dependence on parameter selection. Regarding the absorption coefficient contrast, when the difference between the target body and surrounding rock reaches  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , cavity anomalies can still be clearly identified even under 3% noise interference. However, when the difference is only  $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , the imaging quality deteriorates significantly once the noise level exceeds 1%. This suggests that in practical applications, working frequency bands with pronounced electromagnetic contrast should be prioritized, and effective noise suppression measures must be taken. With respect to transmission-reception spacing, the study shows that increasing the spacing leads to reduced ray path coverage density. When the spacing exceeds 4 m, the imaging quality for cavities of  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  in size becomes noticeably worse. At 8 m, the target is almost entirely unresolvable. This indicates that observation systems in practical projects must be designed according to the size of the target anomaly. For small cavity detection, it is recommended that transmitting spacing be kept within 4 m. Regarding borehole spacing, modeling data demonstrate that when the absorption coefficient difference is  $0.6 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , resolution remains acceptable at borehole spacing up to 30 m. However, when the difference decreases to  $0.4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , cavity anomalies become blurred when spacing exceeds 20 m. This suggests that in regions with weak karst development or minimal contrast between the filling material and the surrounding rock, borehole spacing should be reduced appropriately to ensure detection effectiveness. The field validation further confirms the reliability of the simulation conclusions. In the actual survey conducted near Jingna Road in Guangxi, the electromagnetic wave CT method accurately delineated a cavity development zone between depths of 10m and 15 m. The inversion results closely matched the cavity positions revealed by borehole drilling.

This study systematically identifies the key influencing factors and corresponding mechanisms that affect the resolution capability of electromagnetic wave CT in detecting small karst cavities. Firstly, it confirms that the absorption coefficient contrast is the fundamental determinant of resolution, providing theoretical guidance for frequency selection. Secondly, it quantifies reasonable values for transmitting spacing and borehole spacing, establishing technical standards for observation system design. Finally, it analyzes the interference mechanisms of ambient noise, offering guidance for improving data acquisition quality control. Based on the research findings, the following engineering recommendations are proposed for typical small karst cavity detection scenarios: transmission spacing should be kept within 4 meters, and borehole spacing should not exceed 30 meters. These results not only enrich the theoretical framework of electromagnetic wave CT method but also offer direct and practical guidance for improving the detection accuracy of karst cavities in real-world engineering contexts.

**Key words** electromagnetic wave CT, resolution, absorption coefficient, small karst caves

(编辑 张玲)