

# 浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究

孙怀凤<sup>1</sup>, 吴启龙<sup>1</sup>, 陈儒军<sup>2</sup>, 李海燕<sup>1</sup>, 范秋雁<sup>3</sup>, 刘功杰<sup>4</sup>, 林久卿<sup>4</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 李 凯<sup>1</sup>, 宿传玺<sup>1</sup>

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

3. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 4. 华润水泥控股有限公司, 广西 南宁 530028)

**摘要:** 针对浅层岩溶塌陷产生的工程与环境问题, 研究瞬变电磁对浅层岩溶的响应规律。通过分析将浅层岩溶概化为充填与半充填两类地电模型, 采用时域有限差分法进行三维正演计算, 对比分析电性差异、规模差异以及埋深差异情况下的瞬变电磁衰减曲线特征和视电阻率曲线变化规律。通过数值试验发现: 浅层岩溶充填物的电阻率越低、规模越大, 瞬变电磁衰减曲线中的异常响应幅值越大; 浅层岩溶的瞬变电磁异常响应主要集中在早期; 瞬变电磁对具有一定规模的充填模型与半充填模型均有较好的识别能力。选择某已知区域进行现场试验, 瞬变电磁能够圈定岩溶异常, 并发现未揭露的潜在岩溶发育区。数值试验和现场试验表明, 瞬变电磁探测浅层岩溶需要更早的观测时间和更小的关段时间。

**关键词:** 岩石力学; 浅层岩溶; 瞬变电磁; 响应规律

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)03 - 0652 - 10

## Experimental study on transient electromagnetic responses to shallow karst

SUN Huafeng<sup>1</sup>, WU Qilong<sup>1</sup>, CHEN Rujun<sup>2</sup>, LI Haiyan<sup>1</sup>, FAN Qiuyan<sup>3</sup>, LIU Gongjie<sup>4</sup>,  
LIN Jiuqing<sup>4</sup>, LI Shucui<sup>1</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, SU Chuanxi<sup>1</sup>

(1. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*; 2. *School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China*; 3. *College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China*; 4. *China Resources Cement Holdings Limited, Nanning, Guangxi 530028, China*)

**Abstract:** The characteristics of transient electromagnetic field in detecting shallow karst was studied focusing on the engineering and environmental problems caused by karst collapse. The shallow karst was generalized to be two types of geophysical models. The method of three dimensional finite difference in the time domain was used to simulate the transient electromagnetic responses. The resistivity, the karst size and the buried depth were selected as the comparison parameters. The numerically calculated differences of responses are bigger when the filled karst has the low resistivity and large size. The responses from the karst are mainly in the early stage. The transient electromagnetic field can identify nicely both the filled and half-filled shallow karsts. A field experiment was used to verify the numerical results in Guangxi. The transient electromagnetic profile revealed the known

**收稿日期:** 2017 - 01 - 08; **修回日期:** 2017 - 07 - 24

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41404104); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036002); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD17129047) Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41404104), National Basic Research Program(973 Program)(Grant No. 2013CB036002) and Science and Technology Based Specialized Funding of Guangxi(Grant No. GUI-AD17129047)

**作者简介:** 孙怀凤(1982 - ), 男, 博士, 2006年毕业于山东大学土木工程专业, 现任副教授, 主要从事瞬变电磁理论和方法方面的教学与研究工作。E-mail: sunhuafeng@gmail.com。通讯作者: 李海燕(1965 - ), 男, 现任教授。E-mail: lihaiyan@sdu.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0038

karst and found the unknown karst. The numerical and field experiments indicated that early observation and short time for turn off were better for small loop transient electromagnetic survey for shallow karst.

**Key words:** rock mechanics; shallow karst; transient electromagnetic; response characteristics

## 1 引言

岩溶是水对碳酸盐岩、石膏、盐岩等可溶性岩石进行化学溶蚀作用和冲蚀、潜蚀、崩塌等联合作用的结果。在我国,岩溶广泛分布,并以广西、贵州、四川等地尤为发育。随着我国城市建设、矿山开采、水利设施修建等人文活动的发展,对地下水的无序抽排打破了原有的系统平衡,出现农田塌陷、建筑倾斜、道路坍塌等地质灾害。

据统计,近 50 a 来昆明市已经发生岩溶塌陷事故超过 1 000 起<sup>[1]</sup>;郑州市近 3 a 发生的路面塌陷超过 40 次;贵州省近年出现塌陷区域近 100 处,塌坑 2 200 余个;贵港市近两年城市建设过程中也连续出现了 20 多处岩溶塌陷。该类地质灾害主要是由于地下水场改变造成岩溶充填物流失,使已有岩溶在外部载荷的作用下产生不稳定而发生坍塌。因此,提前查明隐伏的岩溶分布并提前采取预防措施,能够有效防止岩溶塌陷及次生灾害的发生。

从物性特征分析,浅层岩溶的探测既可以使用弹性波方法<sup>[2]</sup>也可以使用电法,本文主要基于浅层岩溶的电性差异展开讨论。常用于浅层岩溶探测的电法有高密度电法<sup>[3-4]</sup>、探地雷达法<sup>[5]</sup>和瞬变电磁法。直流电阻率特征能够直接反映地下岩溶发育区与背景围岩之间的导电性差异,是非常好的探测方法<sup>[6-8]</sup>。然而,高密度电法的测深依赖于地面布设的测线长度,一般的最大探测深度为测线长度的 1/3 左右,而且观测结果为倒三角形。如果要对某一深度  $h$  实现最佳探测效果,则最大探测深度要达到  $2h$ ,相应的地面测线长度要达到  $6h$ ,在某些情况下(例如城市道路塌陷)布设大长度电缆十分困难。另外,普通沥青混合料是绝缘的,在沥青路面布设高密度电极同样存在困难。探地雷达依靠电磁波的反射实现探测,理论上是基于介电常数差异的一种非接触式探测方法,能够对浅层岩溶进行快速识别。然而,探地雷达的频率较高,一般在 MHz 以上,导致其探测深度有限。对于浅层岩溶发育的地质模型,目标深度超过 15 m 就很难使用探地雷达发现。瞬变电磁是一种使用低频电磁场探测低电阻率目标的

球物理方法。瞬变电磁使用电磁场的扩散,具有探地雷达非接触式的特点;同时,使用不同时间道的信号实现测深,不需要布置长导线。使用小线圈瞬变电磁能够对浅层岩溶实现灵活快速的探测<sup>[9-10]</sup>。因此,研究瞬变电磁对浅层岩溶的响应规律,是对浅层岩溶探查手段的补充<sup>[11]</sup>,对遴选有效的探查方法具有重要意义。

瞬变电磁法通过回线向地下发送一次感应电磁场,在对一次场关断的过程中,地下低电阻率的目标会感应产生涡旋电流,关断后观测的纯二次场就是这些涡旋电流产生的电磁场信号。当地下存在岩溶等低电阻率目标时,观测获得的感应二次场信号会高于背景值,并衰减速度减缓,通过对观测到的二次场衰减曲线进行观测和成像,能够圈定地下低电阻率目标的位置和规模<sup>[12]</sup>。目前瞬变电磁法已经广泛应用于近地表地球物理探测与矿产资源探查,例如地下水调查<sup>[13-15]</sup>,金属矿产资源探查<sup>[16-19]</sup>,采空区探查<sup>[13, 20-21]</sup>,岩溶探查<sup>[22]</sup>等。在瞬变电磁探测岩溶方面,H. F. Sun 等<sup>[22]</sup>针对隧道岩溶探测提出了多分量阵列式瞬变电磁探测方法,并对隧道底板下方的岩溶管道进行成像,P. A. Reninger 等<sup>[23]</sup>采用航空瞬变电磁法和钻孔数据联合解释白垩纪中的岩溶地质环境,从而评价地下岩溶系统。在国内,采用瞬变电磁进行岩溶探测的应用较多<sup>[24]</sup>,主要针对地下 30~50 m 范围的岩溶进行探测,然而,瞬变电磁对不同岩溶类型的响应规律和特征并没有进行系统的研究,本研究采用数值试验的方法对地下 30 m 以内的浅层岩溶进行系统研究,总结规律,并进行了现场试验验证。

本研究根据地面浅层岩溶塌陷的电性特征进行地球物理建模,概化了两类浅层岩溶模型(充填模型和半充填模型),基于一般情况下的导电性差异,对这两类模型建立数值模型,参考模型为不包含岩溶的均匀围岩,考虑模型的适用性,在地表设置两层高阻层。采用时域有限差分方法对建立的模型进行三维正演计算<sup>[25-26]</sup>,获取发射回线中心的响应曲线,并对比不同参数(导电性、规模、埋深)下的差异,获得了不同类型岩溶的瞬变电磁响应规律。最后,在广西某已知岩溶区域进行了瞬变电磁探测的试验研究,探测结果与已知部分吻合较好,并圈定了未

揭露的岩溶发育。

## 2 地质模型的地球物理概化

岩溶地下水系统是岩溶动力系统的组成，以水循环为物质传输的主要形式。而浅层岩溶塌陷就是岩溶地下水系统在物质运移之后的一种地表现象。由于溶蚀作用是非常缓慢的过程，因而产生塌陷的浅层岩溶是已经存在的，而不是后形成的。由于岩溶的串珠状发育特征，地下岩溶不是孤立存在的个体，因而其在稳定状态时主要表现为充填物的相对稳定。一旦充填物被带走，则在岩溶地下水系统的反复作用下才会形成塌陷<sup>[27]</sup>。

基于上述地质成因，考虑浅层岩溶的充填物一般为水、泥或杂填土，概化地质模型为充水、半充水、充泥(或杂填土)、半充泥(或杂填土)4类。由于纯空洞形式的岩溶一般较少，因而在概化模型时不予考虑。考虑到水、泥等充填物与周围围岩的电性差异表现在导电性上，考虑到充填物的电性参数差异较小，因而将地球物理模型概化为充填和半充填2类模型。

充填模型能够代表充水和泥质充填型岩溶，其区别在于所采用的岩溶区域电阻率参数存在差别，一般情况下泥质充填比充水时的电阻率要高，当能够明显的圈定泥质充填模型时，充水模拟自然也能够进行探测。半充填模型代表了充填物没有完全填满岩溶的情况，其上部一般为空气，下部为充填物。一般的认识认为瞬变电磁探测高阻异常是没有优势的，然而，半充填模型下部的充填物提供了低阻层，有利于瞬变电磁探测，上部的空气提供的高阻背景反而可能是瞬变电磁探测的优势。同时，为了方便对比，采用没有岩溶的均匀模型作为对比，如图1所示。

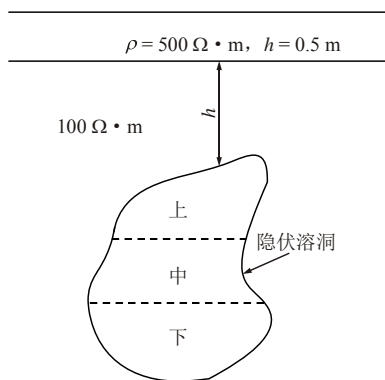


图1 概化的浅层岩溶模型示意图  
Fig.1 Generalized shallow karst models

对于实际地层模型，一般会存在一个相对高阻的覆盖层(例如城市路面的硬化层、农田岩溶中的上覆土层)。因此，概化模型时在表层设计了一个高度为0.5 m、电阻率为500 Ω·m的薄层。如图1所示，隐伏的岩溶一般为不规则发育，设计岩溶埋深为h，将岩溶划分为上中下3部分，这样在计算充填或半充填模型时能够方便的通过改变电性参数来实现。岩溶发育区的背景岩石电阻率设置为100 Ω·m，实际上，当不存在岩溶时，可以认为是一个两层模型。

## 3 数值试验

### 3.1 三维数值正演方法

从Maxwell旋度方程出发，采用Yee晶胞格式进行空间离散，可以得到一组电场与磁场的时间递推公式，能够在时间域直接求解麦克斯韦方程组，从而获得空间任一点在任意计算时刻的场值。这一计算方法成为时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)，其显著优势就是不需要考虑频率采样与时频转换的问题，从而不会在数学变换过程中牺牲分辨率和计算精度<sup>[28-30]</sup>。Maxwell旋度方程如下：

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{H}$ 为磁场强度， $\mathbf{D}$ 为电通量密度， $\mathbf{J}$ 为电流密度， $\mathbf{E}$ 为电场强度， $\mathbf{B}$ 为磁感应强度， $t$ 为时间。

瞬变电磁采用回线作为发射源向地下发生一次场，在进行三维数值正演的过程中，激发源的注入主要有2种：(1)采用关断后某一时刻的均匀模型获得的空间电磁场数据作为初始条件开始计算<sup>[31]</sup>；(2)将激发电流作为源项在方程组中给予考虑，通过计算获得空间的电磁场，关断后直接进行连续计算<sup>[33]</sup>。T. Wang和W. G. Hohmann<sup>[31]</sup>在其经典论文中采用了第1种加载方式，之后有许多学者采用这样方案；孙怀凤等<sup>[32-33]</sup>实现了第2种加载方式，能够考虑瞬变电磁的关断时间、发射波形等参数信息。

采用第2种加载方式在源的位置添加初始电流信息，得到的电场(以 $E_y$ 为例)和磁场(以 $B_y$ 为例)差分迭代公式为

$$\begin{aligned}
 E_y^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) &= \frac{2\gamma-\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\Delta t}{2\gamma+\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\Delta t} \\
 E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) &+ \frac{2\Delta t}{2\gamma+\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\Delta t} \\
 &\left[ \frac{H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right)-H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right. \\
 &\left. \frac{H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)-H_x^{n+1/2}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right] \\
 &\frac{2\Delta t}{2\gamma+\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\Delta t} J_s^{n+1/2} \quad (2) \\
 B_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) &= B_x^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)- \\
 \frac{\Delta t_{n-1}+\Delta t}{2} &\left[ \frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+1\right)-E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta z} \right. \\
 &\left. \frac{E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right)-E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中： $J_s$  为外加场源电流密度。

通过求解电场和磁场的时间迭代公式就可以获得任意所建立地电模型的瞬变电磁响应，其实现过程可以参考相关文献。

### 3.2 衰减曲线规律分析

进行数值正演计算的参数应该尽量与实际情况保持一致，因此，采用  $3\text{ m}\times 3\text{ m}$  的矩形回线发射源，发射电流为  $1\text{ A}$ ，最小网格采用  $0.5\text{ m}$  的 Yee 晶胞，笛卡尔坐标系下 3 个方向的计算网格分别为  $221\text{ 个}\times 221\text{ 个}\times 220\text{ 个}$ ，共包含  $10\ 745\ 020$  个单元，模型的实际尺寸为  $36\ 000\text{ m}\times 36\ 000\text{ m}\times 23\ 000\text{ m}$ ，为了尽量与仪器参数保持一致，采用梯形波激励，但为了获得最佳瞬变电磁响应，关段时间设置为  $1\ \mu\text{s}$ 。

根据最常用的一般情况选择中心回线装置进行逐点测量。然而，为了后续建立浅层岩溶瞬变电磁快速探测系统，参考航空系统<sup>[23]</sup>设计了离开地面的新装置型式，即将发射回线和接收传感器由地面向上提高  $1\text{ m}$ ，仍然采用中心点接收，这样就可以方便的将探测系统固定在塑料小车上进行点测和快速

移动，也可以进行连续测量。

采用上述基本参数计算岩溶不同电阻率、不同规模和不同埋深的瞬变电磁响应特征，不同岩溶的异常体的模型参数在各部分对比时给出，隐伏岩溶异的 3 层电阻率记为  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ，上、中、下 3 层的高度分别设计为  $3, 3, 4\text{ m}$ 。

#### (1) 岩溶填充物电阻率差异模型对比

为了研究浅层岩溶电阻率差异对瞬变电磁响应曲线的影响，设计了 4 组模型进行数值试验，进行模型参数设置时，控制岩溶异常体的规模和埋深不变，改变岩溶上、中、下 3 个区域的电阻率值，详细参数列于表 1。

表 1 电阻率差异对瞬变电磁影响的模型参数

Table 1 The model parameters of the influence of resistivity variation on TEM

模型编号	规模/ (m×m×m)	埋深/m	$\rho_1 /$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\rho_2 /$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\rho_3 /$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	岩溶 类型
1	10×10×10	3	50	30	20	充填
2	10×10×10	3	10 000	10 000	20	半充填
3	10×10×10	3	10	5	2	充填
4	10×10×10	3	10 000	10 000	2	半充填

将计算获得的瞬变电磁衰减曲线绘制在图 2 之中，可以看出：均匀半空间模型的曲线与模型 1 模型曲线在很早期和晚期几乎重合，在  $0.3\sim 1\ \mu\text{s}$  之前模型 1 衰减曲线比均匀半空间模型的背景幅值略高，说明模型 1 中间设计的充填部分引起的瞬变电磁二次场变化。模型 2 和 4 的计算曲线在早期和晚期也几乎重合，而在  $1\sim 11\ \mu\text{s}$  范围出现了较大的幅值差异。在模型 1 中给定的异常区域电阻率与背景电阻率差异相对较小，所以该曲线与均匀半空间曲线基本重合，在电磁场扩散到异常位置时刻出现衰减速度变慢的情况。而模型 3 中给定的电阻率非常低，是为了表现浅层低电阻率异常的响应特征，可以发现在  $0.1\ \mu\text{s}$  之前，低电阻率的响应就已经作用在衰减曲线上了，这是一种探测模型的最有利状态，能够非常明显的反映在计算曲线上。半充填模型(模型 2 和 4)由于上层电阻率较高，在模型设计时按照空气考虑，实际上这是一种最不利状态模型，如果在该条件下能够发现异常，则充填黏土或其他充填物时亦能探测到。实际计算结果发现，最下层的电阻率变化对衰减曲线影响非常大，能够非常明显的识别半充填模型。并且，在  $1\ \mu\text{s}$  左右，模型 4 的衰减曲线与均匀半空间曲线出现交点，可以认为是电磁场传播到低阻含水区域的标志。

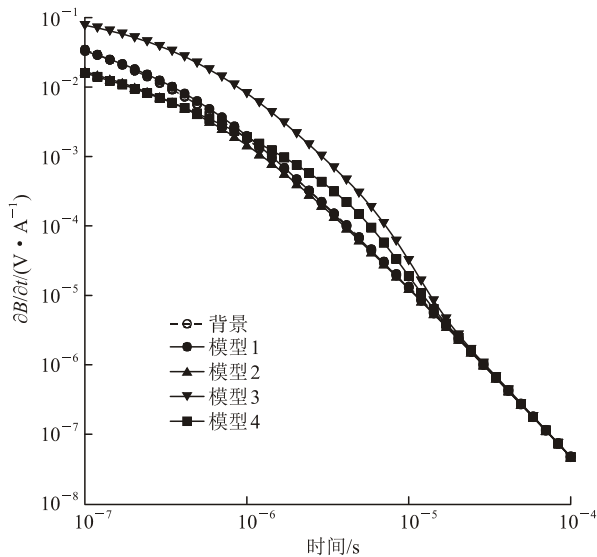


图2 不同异常体电阻率响应曲线对比

Fig.2 Different kinds of cave response curves

通过上述计算曲线对比,可以发现,瞬变电磁对于浅层岩溶具有很好的判识能力,衰减曲线对低电阻率目标的导电性变化敏感,即使在不利情况下,也依然能够表现出与背景场不同的曲线形态。

(2) 岩溶规模差异模型对比

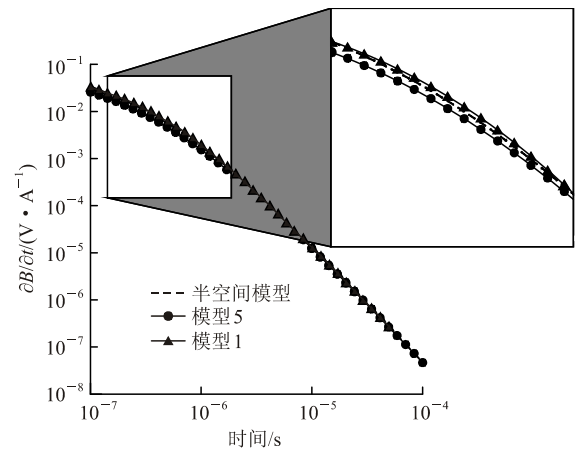
为了研究浅层岩溶规模的差异对瞬变电磁响应曲线的影响,在模型1和2的基础上,增加设计了模型5,6数值试验,进行模型参数设置时,控制岩溶异常体的电阻率和埋深不变,改变岩溶的规模,详细参数列于表2。

表2 考察岩溶规模差异对瞬变电磁影响的模型参数

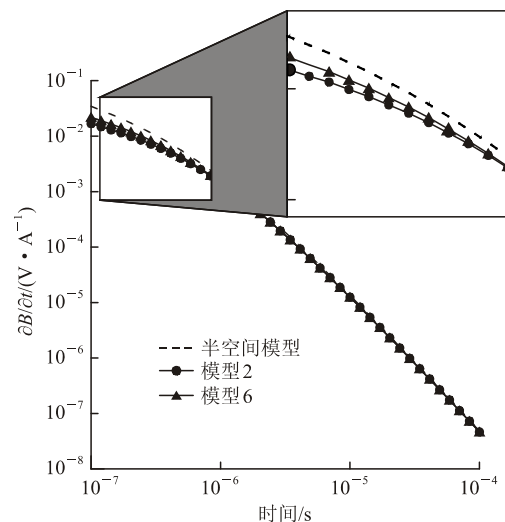
Table 2 The model parameters of the influence of karst size difference on TEM

模型编号	规模/ (m×m×m)	埋深/ m	$\rho_1 /$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2 /$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_3 /$ ( $\Omega \cdot m$ )	岩溶类型
5	5×5×5	3	50	30	20	充填
6	5×5×5	3	10 000	10 000	20	半充填
7	10×10×10	13	10	5	2	充填模型
8	10×10×10	23	10	5	2	充填模型
9	10×10×10	3	50	25	10	充填模型
10	10×10×10	3	10 000	10 000	10	半充填模型
11	10×10×10	3	100	50	25	充填模型
12	10×10×10	3	10 000	10 000	25	半充填模型

图3给出了充填模型和半充填模型的对比衰减曲线,并给出均匀半空间模型曲线作为参考。当地下岩溶规模减小后,不管是充填模型还是半充填模型,在衰减曲线上均能够与均匀半空间模型的曲线区分开来。规模差异情况下的衰减曲线也能够区分,并且岩溶规模越大,响应异常越明显。



(a) 充填模型



(b) 半充填模型

图3 充填和半充填模型不同岩溶规模瞬变电磁响应曲线对比

Fig.3 TEM responses comparison of different karst sizes

(3) 岩溶埋深差异模型对比

为了研究浅层岩溶埋深的差异对瞬变电磁响应曲线的影响,增加设计了模型7,8数值试验,进行模型参数设置时,通过控制岩溶的埋深和电阻率参数不变,改变岩溶的规模,详细参数列于表2。

图4中不同埋深的充填模型参数选用模型3,7和8,异常体深度控制在3,13,23 m。岩溶埋深为3 m时,在0.1~10 μs范围有一个明显的凸起,这是由于低阻异常响应特征,而岩溶埋深为13 m时,衰减曲线仍然存在低阻异常特征,但其幅值与浅埋深时存在较大差异,尽管如此,在衰减曲线上仍然可以对异常体进行识别。当将岩溶埋深增大到23 m时,异常响应较弱,瞬变电磁衰减曲线几乎与均匀半空间重合,已经无法分辨。可见溶洞异常体的埋深对电磁场响应曲线的影响很明显,溶洞的异常体埋深越浅,瞬变电磁探测中响应曲线的早期越容易识别。

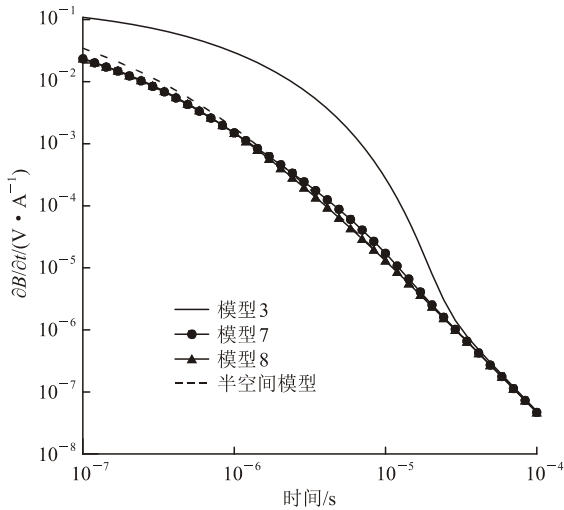
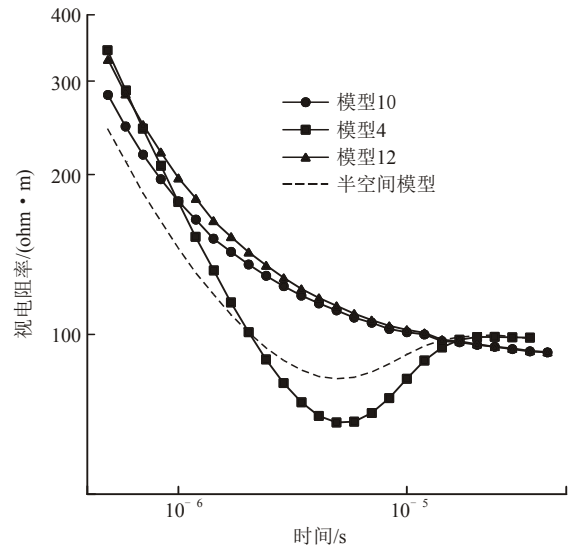


图 4 异常体不同深度响应曲线对比

Fig.4 Different cave depth response curves comparison



(b)

图 5 不同模型的视电阻率 - 时间曲线

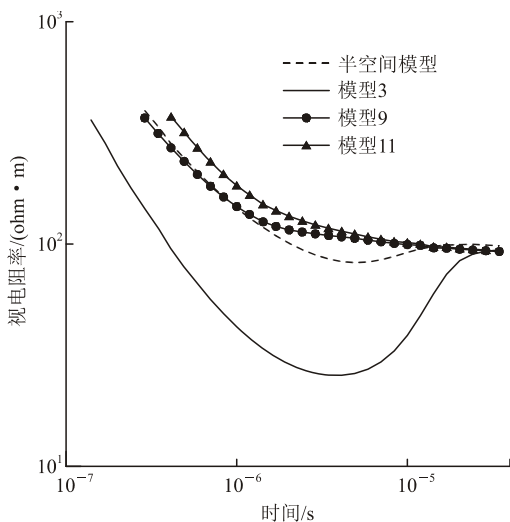
Fig.5 Apparent resistivity to time curves of different models

### 3.3 视电阻率规律分析与成像

为了研究不同溶洞模型的视电阻率曲线差异并对其进行成像<sup>[34]</sup>,增加了表 2 所示的模型 9, 10, 11, 12, 并选取模型 3, 9 和 11 的充填模型, 以及模型 4, 10 和 12 的半充填模型进行视电阻率转换和对比。

#### (1) 全期视电阻率曲线特征

图 5 分别给出了充填模型和半充填模型的视电阻率 - 时间曲线, 对于充填模型: 在晚期的视电阻率均趋向背景电阻率, 早期的视电阻率曲线视计算参数存在较大差异, 但均能够表现出早期的低阻情况, 且低阻情况集中在 0.4~10 μs 范围。对于半充填模型: 由于底层的充填物是低阻, 瞬变电磁仍然能够较好地识别异常, 但由于其上部存在高阻部分, 在视电阻率曲线上表现出了与充填模型不同的特征。



(a)

半充填模型的低阻部分主要集中在 2~11 μs 范围, 比充填模型出现较晚, 低电阻率幅值也比充填模型小。

通过全域电阻率的计算, 视电阻率曲线都能够较好的反应充填和半充填模型的实际地电情况。

#### (2) 不同接收点视电阻曲线特征

为了分析同一发射框在不同位置接收的响应规律与特征分析, 建立如图 6 所示的测线(测点)与溶洞模型的相对位置, 并选取线 111, 模型的中心点为点(111, 111, 111), 依次选取点(91, 111, 111), 点(95, 111, 111), 点(99, 111, 111), 点(103, 111, 111), 点(107, 111, 111), 点(111, 111, 111)进行正演数据采集。

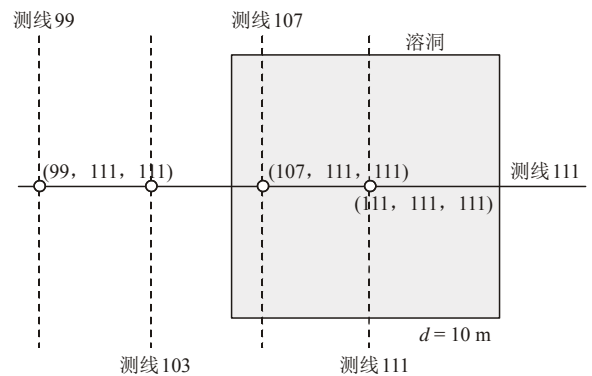
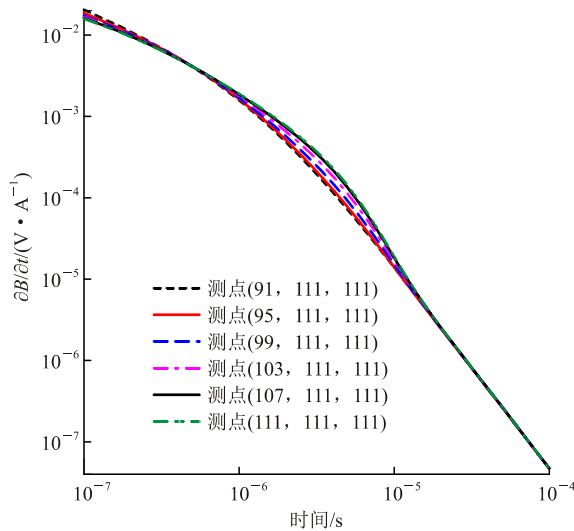


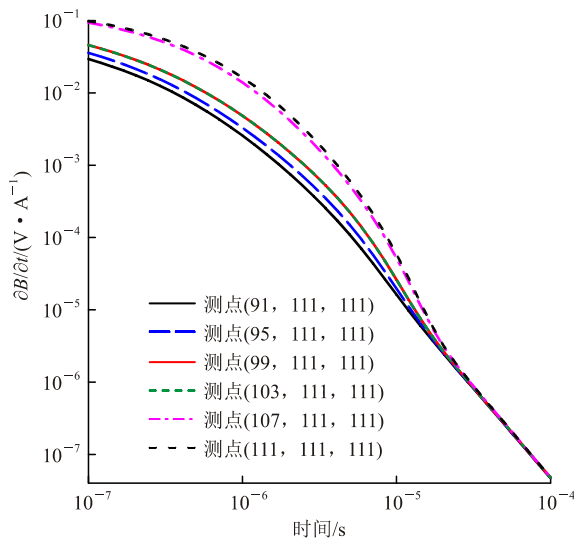
图 6 测线(测点)与溶洞模型相对位置俯视图

Fig.6 Line (point) and karst cave model position vertical view

图 7 给出了不同接收点的衰减曲线, 可见测点越靠近中心点, 响应曲线在 1~10 μs 范围的凸起越明显, 说明受含水异常体的响应越大。但是值得注意的是, 充填模型中点(99, 111, 111)和点(103, 111,



(a) 半充填模型



(b) 充填模型

图7 同一测线不同测点电磁响应曲线

Fig.7 Line response map at different measuring points on the same side line

111)的响应曲线重合,因为这两个测点恰好处在异常体边界点(101, 111, 111)等距的两侧,这2个测点接收异常体的响应基本一致。

### (3) 视深度 - 视电阻率等值线分析

仍然采用图6中相同的网格编号,测线以异常体的中心点(111, 111, 111)为基准点,依次选取点(91, 111, 111),点(95, 111, 111),点(99, 111, 111),点(103, 111, 111),点(107, 111, 111),点(111, 111, 111)进行正演数据采集,发射框(3 m)每次移动2 m,形成测线,其结果如图8所示,对于半充填模型,等值线图像对第二层电阻率为 $2 \Omega \cdot m$ 的低阻体反应很明显,在10 m以下出现面积较大的低阻体,低阻体如浅蓝色部分所示;对于充填模型,异常体在图中深蓝色区域反应良好,与异常体

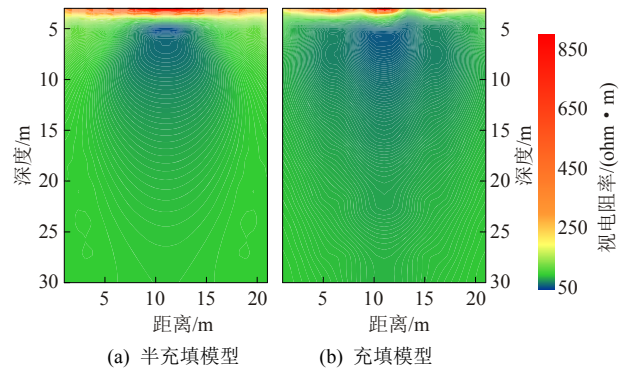


图8 不同模型视电阻率-深度等值线图

Fig.8 Apparent resistivity to depth contour map of the different models

的实际位置吻合。因此,瞬变电磁法在数值模拟方面对于半充填模型和充填模型是可以进行识别的,对于具体的辨别不同溶洞模型的形态可以根据图中2种模型的电阻率响应特征进行区分。

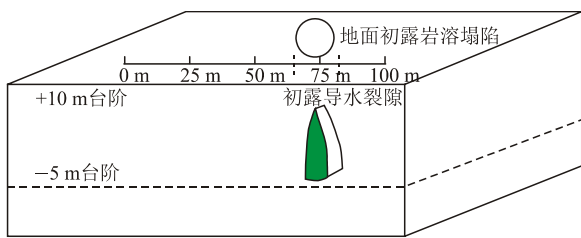
通过岩溶模型的数值计算得出,瞬变电磁法能够识别低电阻率的充填岩溶,能够初步识别空洞岩溶(含富水沉积层),并且通过电性剖面特征对充填岩溶和空洞岩溶(含富水沉积层)进行区分;瞬变电磁法基本能够识别边长大于10 m的岩溶地质体,对于识别小于10 m的岩溶地质体分辨率有限。

## 4 现场试验

### 4.1 场地概况与数据采集

在位于广西壮族自治区的贵港市平南县的某矿山运输道路附近进行了现场试验,该矿区的地下水类型以松散岩类孔隙水和碳酸盐裂隙溶洞水为主,松散岩类孔隙水赋存于第四系冲洪积层砂砾层、粉砂、亚砂土、粉质黏土中,上覆于碳酸盐岩裂隙溶洞水之上,水量水位季节变化明显,碳酸盐岩裂隙溶洞水分布于整个矿区,岩溶发育不均一,多为强富水区。由于矿区内岩溶尤为发育,存在不同程度的充填溶洞模型和半充填模型特征的溶洞,给路基造成了极大的威胁,通过瞬变电磁法能够对路面潜在岩溶进行探查。

现场的测线布置图如图9(a)所示,测线布设在+10 m台段,测线长度为85 m,测线标尺与溶洞涌水的相对位置如图所示,在+10 m台段溶洞初露的位置在测线的68~80 m处,布设的测线在溶洞区域的一侧。现场溶洞初露的情况如图9(b)所示,在地面初露岩溶塌陷下方的-5 m台段出现了一个 $2 m \times 5 m$ 的溶蚀裂隙,并且存在较大的突涌水现象。



(a)



(b)

图 9 现场测线布置情况及溶洞涌水情况  
Fig.9 Introduction of cave water and line layout

采集设备使用 Protem47 瞬变电磁仪，基频选用 62.5 Hz，关断 20 μs，发射电流 1.0 A，点距 1 m，测线长度 85 m。

### 4.2 数据解译与分析

利用烟圈效应对视深度进行计算，瞬变电磁中心回线电阻率计算公式进行电阻率计算，计算得到的视深度 - 视电阻率等值线图如图 10 所示，从图中可以看出，在测线 60~80 m 范围存在一个低阻区域，测线 10~40 m 范围存在一个低阻区域，在图 10 中都已标识，测线 60~80 m 范围存在一个低阻区域，深度在 5~20 m 范围，与现场 -5 m 台段揭露的溶洞地表现象基本吻合，测线 10~40 m 范围存在一个低阻区域，深度在 5~18 m 范围，推断该区域存在溶洞发育的隐患。

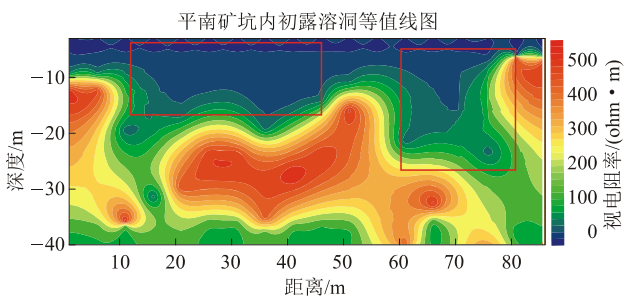


图 10 穿过溶洞测线的等值线

Fig.10 Line passed karst cave contour map

对于广西地区的岩溶现象分析，有较多情况溶洞现象并不是孤立存在，所以该试验区域推断的岩

溶发育情况如图 11 所示，存在 2 个较大的 A 溶洞和 B，由 A 溶洞沿着 1 岩溶裂隙纵向发育产生串珠状溶洞现象，由 B 溶洞沿着 4 岩溶裂隙纵向发育同样产生串珠状溶洞现象，对于 2, 3, 5 区域，由于电阻率相对溶洞区域电阻率较高，可能为过水量较小的岩溶管道或溶蚀小裂隙，或者溶蚀携带的含水淤泥。B 溶洞和 4 岩溶裂隙是地面已经揭露的岩溶区域，A 溶洞和 1, 2, 3, 5 区域为潜在的岩溶发育区域。后经开挖证实 A 处的溶洞和下附的管道系统。

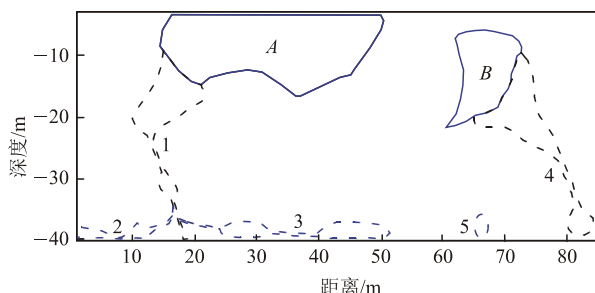


图 11 等值线图推断的岩溶发育  
Fig.11 Karst development of contour map

## 5 结论

通过对充填模型和半充填模型的正演计算，可以发现浅层岩溶含水体的电阻率越低、规模越大，瞬变电磁异常响应幅值越大，浅层岩溶的瞬变电磁异常响应主要集中在早期。并且瞬变电磁对于探测充填和半充填岩溶均具有很好的识别能力。通过现场试验验证，瞬变电磁能够识别一定规模的地面浅层溶洞，能够初步对溶洞中的地下水走向及岩溶发育特征进行判断。但数据采集时应该尽量减小关断时间、并在尽早的时间道采样。

### 参考文献(References):

[1] 邓启江, 李星宇, 吕 琼, 等. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 23 - 29.(DENG Qijiang, LI Xingyu, LU Qiong, et al. Development characters and prevention measures of the karst collapse in Kunming[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 23 - 29.(in Chinese))

[2] 牛建军, 杜立志, 谷 成. 岩溶探测中的弹性波CT方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(4): 630 - 633.(NIU Jianjun, DU Lizhi, GU Cheng. The application of elastic CT method in karst prospecting[J]. Journal of Jiling University: Earth Science, 2004, 34(4): 630 - 633.(in Chinese))

[3] 陈灿华, 廖秀英, 陈绍裘. 高速公路不同地层路基中岩溶洞穴的探



- 测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 1 014 - 1 018. (CHEN Canhua, LIAO Xiuying, CHEN Shaoqiu. Explore karst in different strata of highway roadbed[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2004, 35(6): 1 014 - 1 018. (in Chinese))
- [4] BELGACEM R, BATOBO O, HAKIM G, et al. Electrical resistivity tomography(ERT) applied to karst carbonate aquifers: case study from Amdoun, Northwestern Tunisia[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(4): 1 289 - 1 303.
- [5] 葛双成, 邵长云. 岩溶勘察中的探地雷达技术及应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 476 - 481.(GE Shuangcheng, SHAO Zhangyun. Technique and application of GPR in karst prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 476 - 481.(in Chinese))
- [6] 苏茂鑫, 钱七虎, 李术才, 等. 一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1 428 - 1 434. (SU Maixin, QIAN Qihu, LI Shucai, et al. A method of metro advanced geological prediction under karst geology conduction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1 428 - 1 434.(in Chinese))
- [7] 陈灿华, 陈绍求. 电测深法在岩溶探测中的应用[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(1): 9 - 12.(CHEN Canhua, CHEN Shaoqiu. Application of resistivity sounding method to exploring krast[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2000, 31(1): 9 - 12.(in Chinese))
- [8] PARK M K, PARK S Y, YI M, 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: 2 797 - 2 806.
- [9] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 69 - 70.(NIU Zhilian. Theory of time domain electromagnetic[M]. Changsha: Zhongnan University Press, 2007: 69 - 70.(in Chinese))
- [10] 李 貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002: 5 - 8.(LI Xiu. Theory and application of transient electromagnetic sounding[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002: 5 - 8.(in Chinese))
- [11] 焦险峰, 刘志新. 瞬变电磁法浅层分辨率物理模型实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(4): 738 - 741.(JIAO Xianfeng, LIU Zhixin. Physical model and experimental research on shallow resolution if transient electromagnetic method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(4): 738 - 741.(in Chinese))
- [12] 席振铎, 刘 剑, 龙 霞, 等. 瞬变电磁法三分量测量方法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 272 - 276.(XI Zhenzhu, LIU Jian, LONG Xia, et al. Three-component measurement in transient electromagnetic method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 272 - 276.(in Chinese))
- [13] XUE G Q, CHENG J L, ZHOU N N, et al. Detection and monitoring of water-filled voids using transient electromagnetic method: a case study in Shanxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(5): 1 - 8.
- [14] EZERSKY M, LEGCHENKO A, AL-ZOUBI A, et al. TEM study of the geoelectrical structure and groundwater salinity of the Nahal Hever sinkhole site, Dead Sea shore, Israel[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(1): 99 - 112.
- [15] VRBANCICH J. An investigation of seawater and sediment depth using a prototype airborne electromagnetic instrumentation system-a case study in Broken Bay, Australia[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57: 633 - 651.
- [16] YANG DIKUN, OLDENBURG DOUGLAS W. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit[J]. Geophysics, 2012, 77(2): B23 - B34.
- [17] CHRISTENSEN NIELS B. Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(1): 1 - 19.
- [18] PODGORSKI J E, AUKEN E, SCHAMPER C, et al. Processing and inversion of commercial helicopter time-domain electromagnetic data for environmental assessments and geologic and hydrologic mapping[J]. Geophysics, 2013, 78(4): E149 - E159.
- [19] 周 胜, 席振铎, 宋 刚, 等. 深海拖曳式瞬变电磁的响应规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2): 605 - 610.(ZHOU Sheng, XI Zhenzhu, SONG Gang, et al. Responses of the towed transient electromagnetic sounding on deep seafloor[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(2): 605 - 610.(in Chinese))
- [20] LI H, XUE G Q, ZHOU N N, et al. Appraisal of an array TEM method in detecting a mined-out area beneath a conductive layer[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(10): 2 917 - 2 929.
- [21] 刘树才, 刘志新, 姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 36(4): 414 - 417.(LIU Shucai, LIU Zhixin, JIANG Zhihai. Transient electromagnetic detecting technique for water hazard to the roof of fully mechanized sub-level caving face[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 36(4): 414 - 417.(in Chinese))
- [22] SUN H F, LI X, LI S C, et al. Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2012, 9(4): 359 - 373.
- [23] RENINGER P A, MARTELET G, LASSEUR E, et al. Geological environment of karst within chalk using airborne time domain electromagnetic data cross-interpreted with boreholes[J]. Journal of

- Applied Geophysics, 2014, 106: 173 - 186.
- [24] 张志豪, 李荣先, 梁延广, 等. 地下溶洞调查物探技术探讨[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 877 - 887.(ZHANG Zhihao, LI Rongxian, LIANG Yanguang, et al. Discussions on geophysical prospecting technology of underground karst cave investigation[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 877 - 887.(in Chinese))
- [25] 孟庆鑫, 潘和平. 地 - 井瞬变电磁响应特征数值模拟分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1 046 - 1 053.(MENG Qingxin, PAN Heping. Numerical simulation analysis of surface-hole TEM responses[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1 046 - 1 053.(in Chinese))
- [26] 孟庆鑫, 潘和平. 井中磁源瞬变电磁三维时域有限差分数值模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 649 - 655.(MENG Qingxin, PAN Heping. 3D FDTD numerical simulation for transient electromagnetic of magnetic source in borehole[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(2): 649 - 655.(in Chinese))
- [27] 赵博超, 朱 蓓, 王弘元, 等. 浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 515 - 521.(ZHAO Bochao, ZHU Bei, WANG Hongyuan, et al. Influence factors and mathematical models of karst collapses[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5): 515 - 521.(in Chinese))
- [28] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 12 - 13.(GE Debiao, YAN Yubo. Finite difference time domain method of electromagnetic wave[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005: 12 - 13.(in Chinese))
- [29] 余文华, 苏 涛, MITTRA R, 等. 并行时域有限差分[M]. 北京: 中国传媒大学出版社, 2005: 25 - 45.(YU Wenhua, SU Tao, MITTRA R, et al. Parallel finite difference time domain method[M]. Beijing: Communication University of China Press, 2005: 25 - 45.(in Chinese))
- [30] 王长清. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994: 1 - 66.(WANG Changqing. Finite difference time domain method in computational electromagnetic[M]. Beijing: Peking University Press, 1994: 1 - 66.(in Chinese))
- [31] WANG T, HOHMANN W G. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 797 - 809.
- [32] 孙怀凤, 李 貅, 李术才, 等. 考虑关断时间的回线源激发TEM 三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1 049 - 1 064.(SUN Huai Feng, LI Xiu, LI Shucai, et al. Three dimensional FDTD modeling of TEM excited by loop source considering ramp time[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1 049 - 1 064.(in Chinese))
- [33] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2013.(SUN Huai Feng, Three-dimensional transient electromagnetic responses of water bearing structures in tunnels and prediction of water inrush sources[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2013.(in Chinese))
- [34] 王华军. 时间域瞬变电磁法全区视电阻率的平移算法[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1 936 - 1 942.(WANG Huajun. Time domain transient electromagnetism all time apparent resistivity translation algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1 936 - 1 942.(in Chinese))