

隧道突水灾害电阻率层析成像法实时监测 数值模拟与试验研究

刘 斌, 聂利超, 李术才, 李利平, 宋 杰, 刘征宇

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 突水灾害已成为危及隧道安全施工的重大问题, 为了实现隧道突水灾变演化过程的监测和灾害预警, 将电阻率层析成像法尝试引入到隧道突水的监测工作中, 提出了一种基于图像灰度相关性理论的电阻率层析成像监测信息定量评价方法。首先, 针对非地质缺陷类和地质缺陷类这两种典型的突水类型进行概化, 得到了突水灾变演化过程不同阶段的地电模型, 为隧道突水实时监测数值模拟奠定了基础。其次, 采用有限单元法进行电阻率层析成像法突水实时监测数值模拟, 揭示了电阻率图像对突水灾变演化过程的响应特征, 通过对突水灾变演化过程电阻率图像灰度相关性的定量分析, 发现相关性系数小于 0.5 (或 0.3) 的样本点数目大幅增多, 且相关性分布和正演图像标准差急剧增大, 是突水发生的重要前兆特征。最后, 进行了隧道突水电阻率层析成像法实时监测模型试验, 较准确地捕捉到了突水前兆信息, 实现了突水灾害预警, 表明电阻率层析成像法用于突水实时监测是可行的。

关键词: 突水灾害; 电阻率层析成像; 图像灰度; 相关性; 数值正演; 模型试验

中图分类号: U452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)11-2026-10

作者简介: 刘 斌(1983-), 男, 山东高唐人, 讲师, 从事地下工程地质灾害预报与防治研究。E-mail: liubin0635@163.com。

Numerical forward and model tests of water inrush real-time monitoring in tunnels based on electrical resistivity tomography method

LIU Bin, NIE Li-chao, LI Shu-cai, LI Li-ping, SONG Jie, LIU Zheng-yu

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Water inrush hazard has been a major issue that seriously imperils safe construction of tunnels. In order to achieve real-time monitoring of evolution process of water inrush and disaster warning, the electrical resistivity tomography (ERT) method is introduced for monitoring water inrush in the tunnels. A quantitative evaluation method of ERT is proposed based on the gray correlation theory to quantitatively describe the monitoring information of water inrush. First, the two typical kinds of water inrush hazards caused by geological defects and non-geological defects are generalized, and geoelectric models of different stages during the evolution process of water inrush are acquired, which lays a foundation for numerical forward of real-time monitoring of water inrush of tunnels. Then, the finite element method is adopted to carry out the numerical forward, and the response characteristics of water inrush evolution process are revealed. ERT gray correlation quantitative analysis of water inrush process is done. Sample points whose correlation coefficient is less than 0.5 or 0.3 greatly increase, and the standard deviations of correlation distribution and forward image dramatically increase, which are an important precursory pattern when water inrush happens. Finally, model tests on ERT of water inrush of tunnel are performed, and precursor information of water inrush is captured well and disaster early-warning of water inrush is realized, which shows it is feasible that ERT is applied to real-time monitoring.

Key words: water inrush; electrical resistivity tomography; image gray; correlation; numerical forward; model test

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51139004); 国家自然科学基金青年项目 (41102183); 中国博士后科学基金 (20110491596); 山东省自然科学基金项目 (ZR2011EEQ013); 山东省博士后基金项目 (201102013); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20110131120070); 山东大学自主创新基金项目 (2010GN059, 2010TS038)

收稿日期: 2012-02-03

0 引 言

近年来,在交通、水电等领域修建的长大隧道(洞)

工程越来越多,面临的地质条件日益复杂,发生了多次突水突泥灾害,为隧道施工带来了巨大的安全问题与经济损失,并极易诱发次生地质灾害和生态环境问题^[1-3]。因此,开展隧道突水灾害的实时监测具有重要的工程价值与理论意义。

突水灾变演化过程伴随着岩体应力、渗透性变化与地下水活动。通过监测突水灾变过程中的应力、应变、位移、温度、水压等物理量的变化来捕捉突水前兆信息是进行突水预测预报的常用方法和手段,可以起到较好作用,但仅能反映观测点的变化情况,监测范围往往受到限制,无法实现面积性或体积性的大范围监测,地球物理探测技术是实现面积性或体积性监测的好方法。微震监测技术是近年来被引入到突水监测领域的一种效果显著的地球物理方法,杨天鸿等^[4]、姜福兴等^[5]、李铁等^[6]对突水微震监测技术在理论研究、工程实践方面进行了深入的研究,取得了较好的效果。在岩层断裂和渗流通道形成过程中必然伴随着地下水的活动,由于地下水的活动对围岩的导电性影响很大,所以利用电阻率法来进行突水灾变演化过程实时监测具有独特的优势。同时,电阻率层析成像法在地震监测^[7]、污染物运移监测^[8]以及滑坡监测^[9-10]等方面的成功应用,为突水灾害的监测提供了重要参考。刘树才等^[11]对煤层底板采动导水裂隙带演化地电模型进行了深入的正演研究,并将该方法成功用于工程实践。刘盛东等^[12]研究了渗流中地电场参数的空间瞬态响应,以电位、电流等时线和视电阻率等时面特征为依据进行突水监测,并进行了现场试验。刘斌等^[13]研究了电阻率层析成像实时监测矿井突水灾变演化过程的动态响应特征,并应用于矿井突水模型试验。

综上所述,突水实时监测与预测的研究工作主要集中在矿山领域,而在隧道突水预测方面主要以地质预报方法为基础的临近预警为主,而关于隧道突水灾害实时监测的报道或文献较少,电阻率层析成像法用于突水灾害监测尚处于初步阶段,面临着一些亟待解决的关键问题:①目前电阻率层析成像法突水监测以应用研究为主,缺乏典型突水监测的系统正演研究,隧道突水灾变演化过程不同阶段的地电模型亟待建立,这是电阻率层析成像法实时监测突水灾害的基础;②电阻率层析成像法对隧道突水灾变演化过程不同阶段的响应特征与突水前兆规律是亟待解决的重点问题;③目前的电阻率层析成像法解释大多依靠图像本身,对图像的定量解释研究较少,难以实现对突水前兆信息的量化评价,对灾害的预测不利。

针对以上问题,本文提出了隧道突水电阻率层析成像法实时监测模拟方法及其图像定量评价方法,建立了两种典型突水类型的突变过程的地电模型,利用

对视电阻率图像的定性直观分析与定量评价,揭示了突水前兆规律,并开展了ERT法监测突水物理模型试验,验证ERT法的可行性与有效性。

1 隧道突水电阻率层析成像法实时监测方法

1.1 隧道突水电阻率层析成像实时监测模拟方法

电阻率层析成像法是一种阵列式的监测方法,将电极按照一定的极距布置在监测目标区域表面,选择一定的装置型式进行探测。

点电源异常电位 u 满足的偏微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \nabla(\sigma \nabla u) &= -\nabla(\sigma' u_0), \\ \frac{\partial u}{\partial n} &= 0 \quad \in \Gamma_n, \\ \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\cos(r, n)}{r} u &= 0 \quad \in \Gamma_\infty. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 u_0 为正常电位; σ_0 和 σ 分别为围岩和异常体的电导率; σ' 为异常电导率, $\sigma' = \sigma - \sigma_0$; Γ_n 为求解区域的地面边界; Γ_∞ 为求解区域的地下无穷远边界^[13]。

本文利用有限单元法求解三维点源电场异常电位偏微分方程的变分问题,利用八节点六面体单元对求解区域进行剖分,得到单元系数矩阵,最终合成总体系数矩阵,得到的线性方程组进而得到各节点的电位,计算出各测点的视电阻率,实现层析成像法的正演计算。

1.2 隧道突水电阻率实时监测图像定量评价方法

图像灰度相关性是评价图像动态变化的有效方法,利用ERT法监测突变活动,主要依靠对视电阻率图像的直观分析和观察来判断突变过程,这固然非常重要,但仅依靠直观定性分析很难定量地评价突水灾变信息,对突水灾害的预测不利。基于灰度的相关算法是根据一对图像的灰度点与点匹配,或区域与区域之间的匹配,采用相关算法来衡量两幅图像的相似性。近年来,在计算机图像处理、医学图像分析^[14]与岩土工程监测^[15-16]等方面得到广泛应用,取得了较好的效果。

设 $f_0(x, y)$, $f_L(x, y)$ 分别为突水灾害演化过程实时监测时程上两幅图像的灰度函数,其中 $f_0(x, y)$ 为参考图像灰度函数,代表起始状态; $f_L(x, y)$ 为突水灾变过程监测图像的灰度函数,代表突水灾变过程的某一状态; x, y 为参考图像和变形图像的像素坐标。计算 $f_0(x, y)$ 和 $f_L(x, y)$ 的相关性分布,首先将 $f_0(x, y)$ 和 $f_L(x, y)$ 的图像按同样的方式划分为 $m \times n$ 个小区域,计算公式如下:

$$C_{ij} = \frac{\left| \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(f_0(x_i, y_j) - \bar{f}_0)(f_L(x_i, y_j) - \bar{f}_L)] \right|}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_0(x_i, y_j) - \bar{f}_0)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_L(x_i, y_j) - \bar{f}_L)^2 \right]}} \quad (2)$$

式中 x_i, y_i 为小区域内的局部坐标; \bar{f}_0 为基准图像划分的小区域内灰度的均值; \bar{f}_L 为突水灾变演化过程中图像划分的小区域灰度的均值。

相关系数 $0 \leq C_{ij} \leq 1$, 对于突水实时监测图像而言, 当相关系数 $C_{ij} = 1$ 时, 表示两幅子区域完全相同, 实时监测图像相对于基准图像未发生变化, 当相关系数 C_{ij} 越小, 表示两幅子区域相似程度越差, 实时监测图像相对于基准图像发生的变化越大。因此, 本文利用突水灾变过程中的电阻率图像与初始电阻率图像之间的变化程度, 来定量地描述突水灾变过程的发展。

2 典型隧道突水灾害 ERT 法实时监测数值模拟

突水灾变演化过程具有岩体应力、渗透性等参数的变化, 有关实验表明, 受载岩体的电阻率随着应力的改变而变化, 但岩石电阻率的变化与其内部的孔隙度及饱和度有着最为密切的关系, 对岩体电阻率变化起主导作用的是岩体中的孔隙、裂隙发育程度、含水性以及水的矿化度^[17-19]。对于某一具体的隧道工程而言, 水的矿化度是稳定的, 因此围岩的裂隙、孔隙与水的充填情况是影响其电阻率的主控因素。因此, 可将应力状态变化对电阻率的影响转化为裂隙扩展、地下水活动引起的电阻率变化, 这使得突水灾变过程地电模型的建立大为简化。因此, 本文假设岩层的电阻率均一 (500 Ωm), 假设岩溶充填物的电阻率分布均一 (200 Ωm), 水体的电阻率均一 (10 Ωm); 在突

水灾变过程中未出现新裂隙的区域围岩的电阻率保持不变, 而不受围岩变形等因素的影响; 假设在突水灾变过程中形成的未被水体充填的裂隙的电阻率为 $1 \times 10^5 \Omega m$, 被水充填的裂隙的电阻率为 10 Ωm。

2.1 非地质缺陷类隧道突水 ERT 法数值模拟

(1) 非地质缺陷类隧道突水灾变过程地电模型
文献[20]为承压含水构造作用下的圆形隧道平面模型, 如图1所示, 球形水体半径 r 为 10 m, 圆形隧道半径 r_0 为 5 m, 球心与隧道中心线距离为 22.5 m。

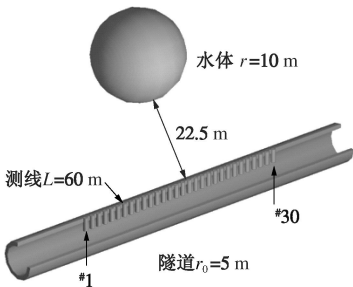


图 1 非地质缺陷类隧道突水示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water inrush by non-geological defects

本文将文献[20]中承压含水构造的突水灾变过程简化为 6 步, 建立了相应的地电模型 (如图 2), 6 个分图体现了裂隙萌生、扩展、贯通等一系列突水通道形成过程, 具体如下: ①第 1 步为原始状态, 在水体和隧道周边尚未产生裂隙; ②第 2 步为裂纹裂隙萌生阶段, 隧道周边围岩最早出现压剪破坏而产生裂隙, 同样水体周边围岩也呈现同样的破坏规律; ③第 3 步、

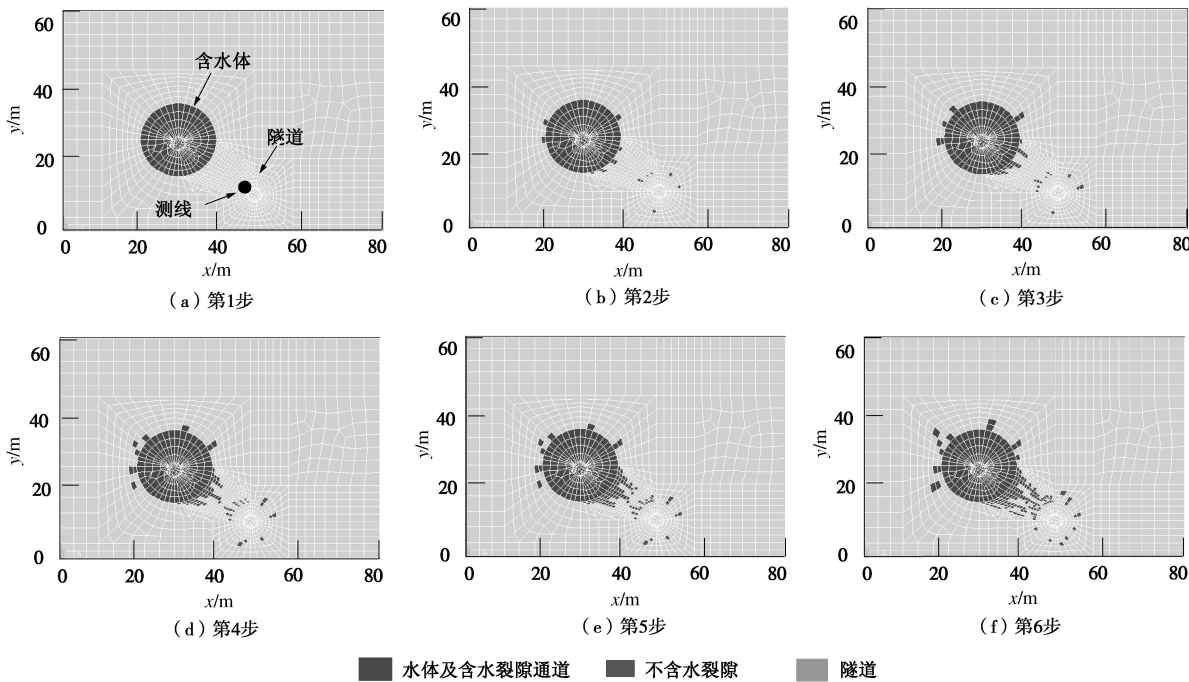


图 2 非地质缺陷类突水灾变过程的简化地电模型

Fig. 2 Simplified geo-electric model for water inrush evolution process by non-geological defects

第 4 步和第 5 步是裂隙裂纹的扩展阶段, 隧道周边微裂隙的数量增加, 并进一步向水体方向扩展, 而水体周围的裂隙在水压的作用下以隧道方向为优势方向继续扩展; ④第 6 步为突水通道的贯通阶段, 随着裂纹裂隙的进一步扩展, 在隧道与水体的连接方向上裂隙汇集成线, 突水通道即将形成。

(2) 非地质缺陷类突水灾变过程正演的响应特征

采用 30 个电极施伦贝谢尔装置型式 (数据为 14 层) 开展层析成像法实时监测研究, 测线长度 L 为 60 m, 沿隧道走向布置, 电极间距为 2 m, 电极编号如图 1 所示, 正演模拟结果如图 3 所示。其响应特征如下: ①裂隙产生初期, ERT 数据对隧道周边的干燥裂隙响应较敏感, 表现为 ERT 图像浅部存在明显的高阻区域, 如图 3 (b); ②裂隙扩展阶段, 隧道周边干燥裂隙的增加导致 ERT 图像浅部视电阻率升高, 而水体周围含水裂隙的扩张导致 ERT 图像中部和底部的视电阻率幅值呈降低趋势, 如图 3 (c) ~ 3 (e); ③裂隙贯通阶段, 由于含水裂隙的扩展与贯通导致 ERT 图像浅部视电阻率较高的区域明显缩小, 其视电阻率幅值亦明显降低, 整个 ERT 图像低阻区域明显扩张, 是

突水灾害即将发生的重要征兆, 如图 3 (f)。

(3) ERT 图像灰度相关性分析

选取初始状态作为基准图像 (图 3 (a)), 将图像分割成 19×52 块子区域, 计算非地质缺陷类突水 ERT 图像的相关性分布, 结果如图 4 所示。在突水发展的时程上, 随着裂隙的产生与扩展, 突水灰度相关性分布图像响应敏感, 与基准原始图像的变化越来越大, 表现为相关性系数变小, 相关性小的区域不断扩展, 在裂隙贯通前, 相关性较小的区域面积急剧增大, 表明图像变化的“速率”增加, 是突水灾变的重要前兆特征。

2.2 地质缺陷类隧道突水 ERT 法数值模拟

(1) 地质缺陷类隧道突水灾变过程地电模型

文献[20]以岩溶充填物诱发的突水灾害为例分析了充填物失稳与突水通道形成过程, 地质缺陷类型为充填岩溶管道, 半径 r 为 0.3 m, 其规模和位置如图 5 所示。本文借鉴文献[20]给出的突水通道形成过程简化为 4 步, 建立了相应的地电模型, 如图 6 所示。①第 1 步为原始状态, 地表尚未降水, 岩溶管道中以充填为主, 有少量水渗入隧道中; ②第 2 步为充填物下

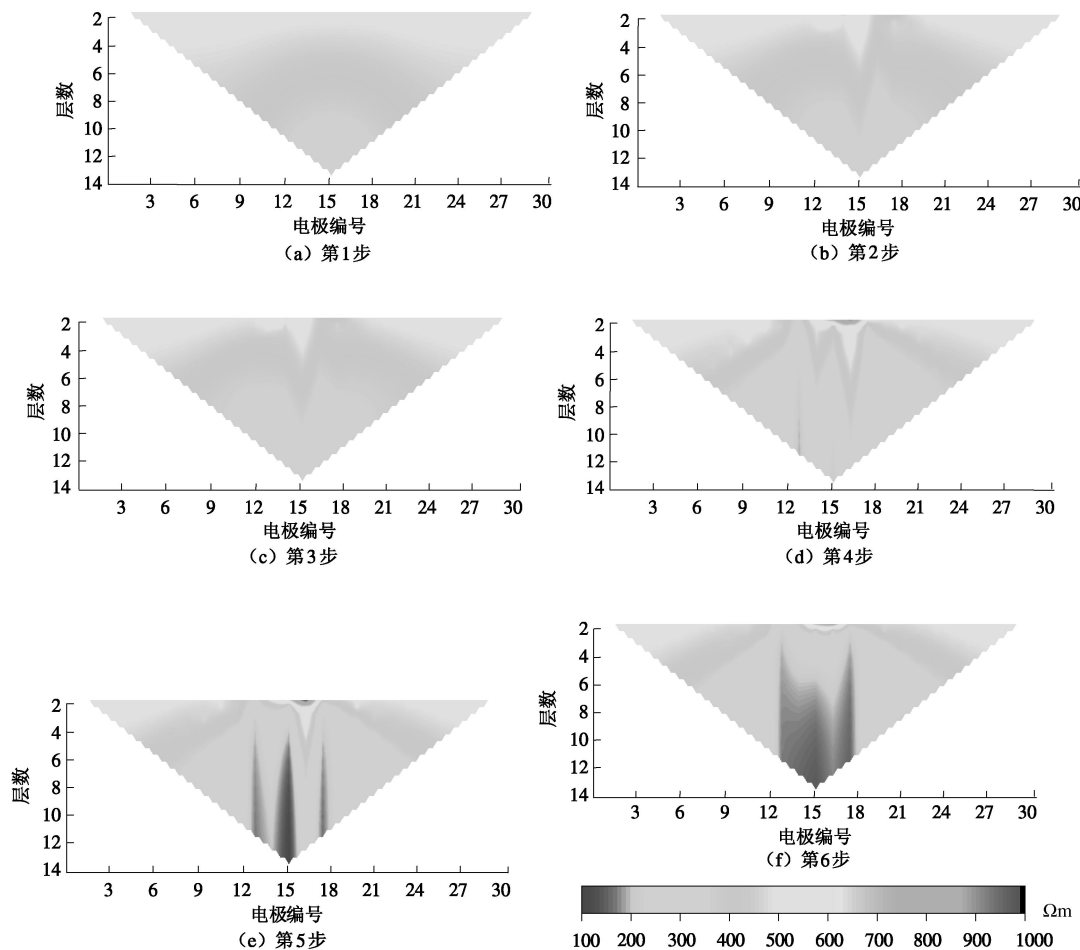


图 3 非地质缺陷类突水灾变过程实时监测正演结果

Fig. 3 Numerical modeling results of real-time monitoring during water inrush evolution process by non-geological defects

沉堆积阶段，地表降水后汇入管道内，管道内的充填物自上部开始逐渐下沉堆积，但充填物尚未堆实，隧道中仍有水流出；③第3步为充填物堆实阶段，充填物形成密实的堆积体，阻水性能增强，隧道内几乎无水流出；④第4步为充填物即将失稳阶段，充填物在管道口处堆积，密实体即将滑出管道，突水灾害即将发生。

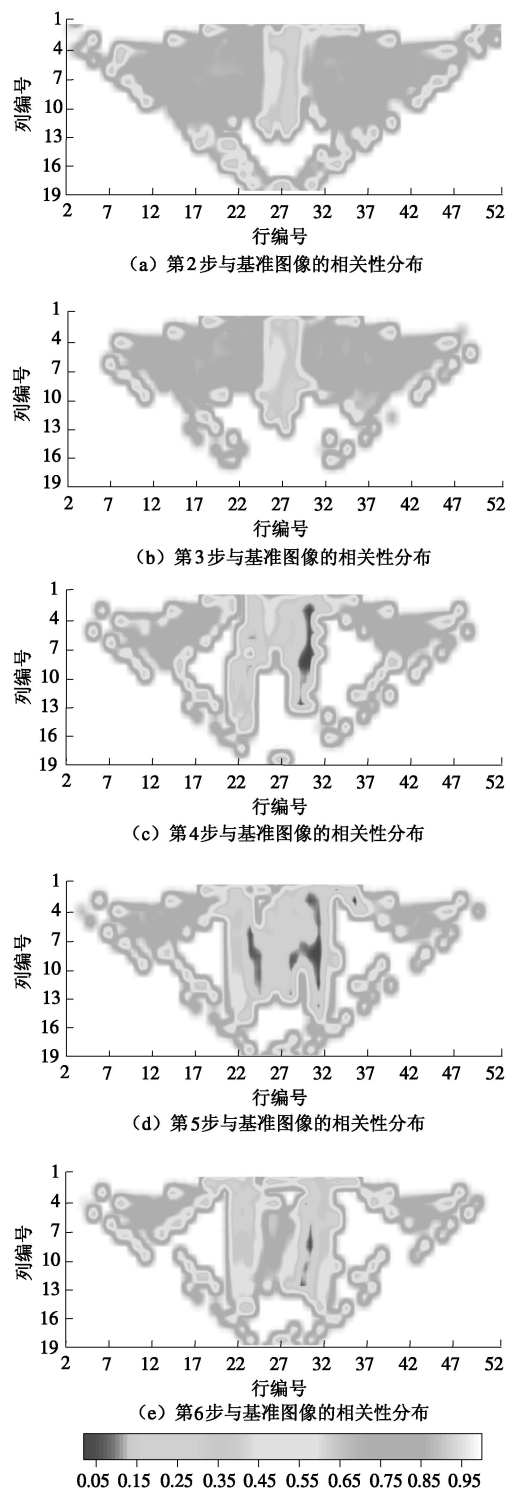


图 4 非地质缺陷类突水灾变过程图像灰度相关性分布

Fig. 4 Gray correlation distribution during water intrusion evolution process by non-geological defects

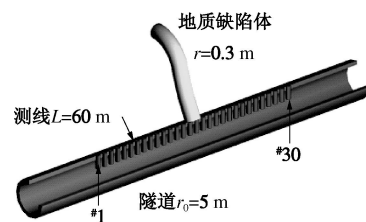


图 5 地质缺陷类隧道突水示意图

Fig. 5 Schematic diagram of water intrusion of geological defects

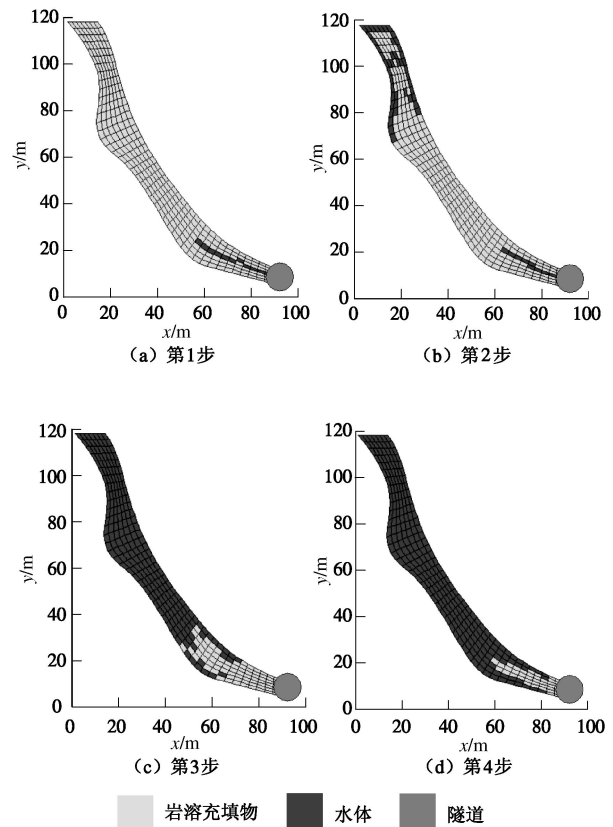


图 6 地质缺陷类突水灾变过程的简化地电模型

Fig. 6 Simplified geo-electric model for water intrusion evolution process by geological defects

(2) 地质缺陷类突水灾变过程正演的响应特征

测线长度 L 为60 m，沿隧道走向布置，电极间距为2 m，电极编号如图5所示，采用30个电极施伦贝谢尔装置型式开展ERT数值模拟研究，正演模拟结果如图7所示。对于地质缺陷类突水，在突水灾害孕育形成过程中，ERT图像中视电阻率数据幅值呈逐渐降低的趋势，特别是在突水灾害即将发生前ERT图像形态发生显著变化，视电阻率数据幅值显著降低，如图7(d)，这是针对突水灾害的ERT数据的主要响应特征。

(3) ERT 图像灰度相关性分析

选取初始状态作为基准图像（图7(a)），将图像分割成 19×52 块子区域，计算非地质缺陷类突水ERT图像的相关性分布，结果如图8。随着突水的发展，灰度相关性分布图像与基准原始图像的相关性系数变小，且相关性小的区域呈现单调扩展趋势，特别在第4

步其面积急剧增加发生突变,是一个重要的响应特征。

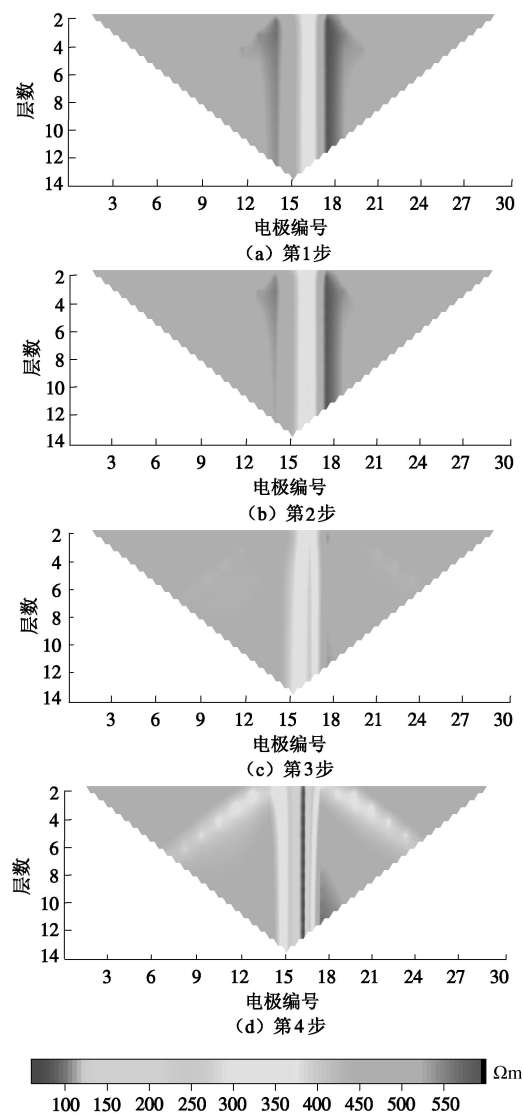


图 7 地质缺陷类突水灾变过程实时监测正演结果

Fig. 7 Numerical modeling results of real-time monitoring during water inrush evolution process by geological defects

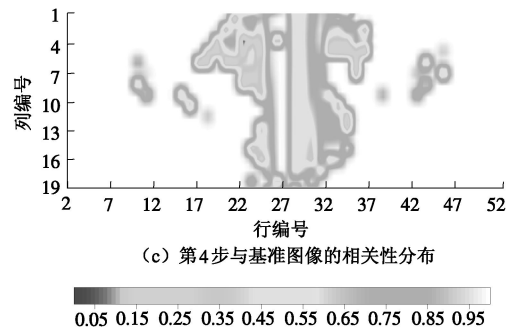
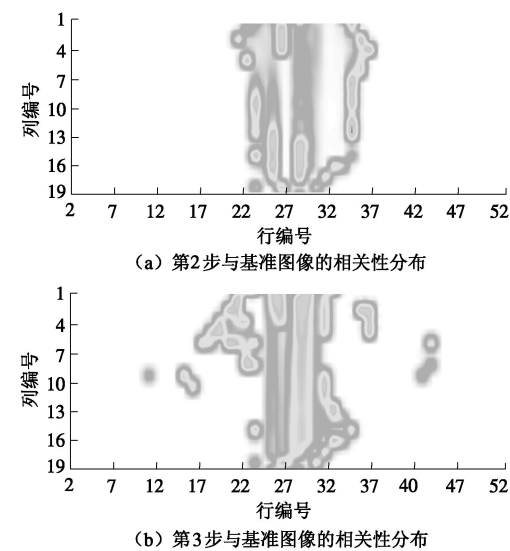


图 8 地质缺陷类突水灾变过程图像灰度相关性分布

Fig. 8 Gray correlation distribution during water inrush evolution process by geological defects

2.3 隧道突水实时监测 ERT 法响应特征分析

从对ERT视电阻率图像和灰度相关性分布图像的定性分析和定量分析的角度出发,总结ERT法对隧道突水灾变过程的响应规律。

(1) 对ERT图像的定性分析:在上述2个典型突水监测模拟案例中,ERT视电阻率图像中异常区域基本上呈现单调扩展的趋势,且在突水发生前,异常区域变化“速率”明显增加。而ERT灰度相关性分布图上,相关性系数不断变小,低相关性区域基本上呈现单调扩展的趋势,在突水通道即将贯通时,低相关区域面积出现急剧增大。

(2) 对ERT图像的定量分析:对于灰度相关性分布图而言,样本数值越小表征监测图像局部变化较大,可用图像的标准差计算;样本值较小的数目越多,表征突水实时监测图像发生较大变化的区域愈来愈多,本文以相关性系数小于0.5(变化)或0.3(较大变化)为例进行统计计算。应用样本数目与标准方差的统计学方法可以定量的表征突水的发展,同时对电阻率正演图像进行标准差计算,结果见图9,10。

分析可知,随着突水灾变过程的发展,相关性系数小于0.5(或0.3)的样本点数逐渐增大,且相关性分布标准差 S_t 值和电阻率监测正演图像标准差 S_t 值亦逐渐增大,都呈现“基本单调发展”。在突水灾害即将发生时,对于非地质缺陷类突水,相关性系数小于0.5的样本数增幅为29%,小于0.3的样本数增幅为32%,且相关性分布标准差 S_t 值增幅为9%,电阻率监测正演图像 S_t 值增幅为18%;对于地质缺陷类突水,相关性系数小于0.5的样本数增幅为16%,小于0.3的样本数增幅为3%,且相关性分布标准差 S_t 值增幅为6%,电阻率监测正演图像 S_t 值增幅为87%。因此,发生较大变化的样本点数、相关性分布的 S_t 值与视电阻率图像的 S_t 值急剧增大(或突变),这是突水灾害发生的重要的前兆特征,可作为预测突水灾害的依据。

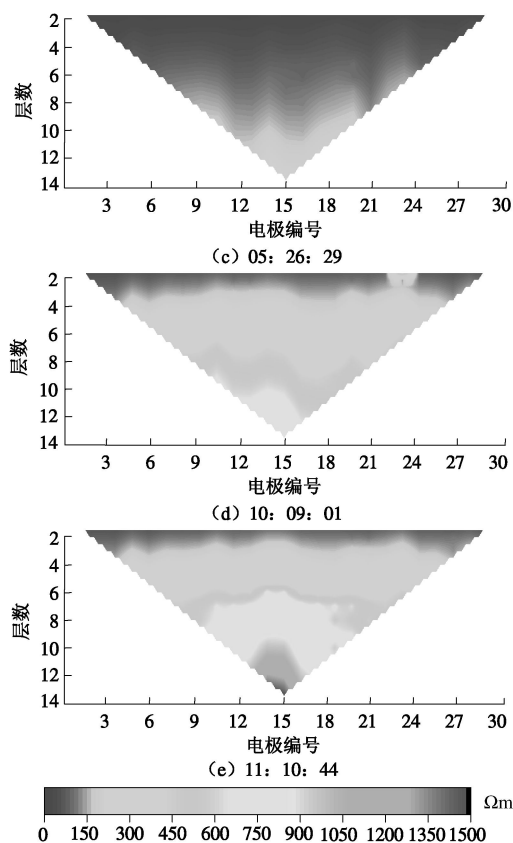


图 12 不同时刻视电阻率数据断面图

Fig. 12 Sectional drawing of apparent resistivity at different time

在渗流稳定阶段(00:33:38时刻、05:26:29时刻), 没有形成较大的渗流通道, 使监测层中的渗流活动处于相对稳定阶段, 监测层电阻率结构均匀, 变化不大, 灰度相关性分布表现为相关性系数较高。

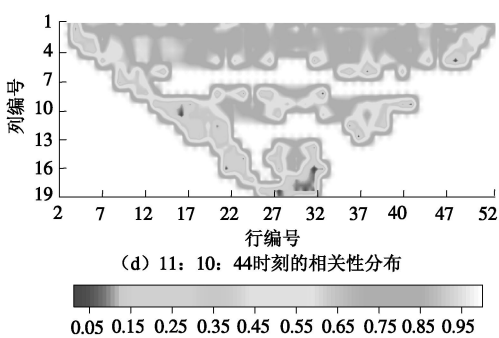
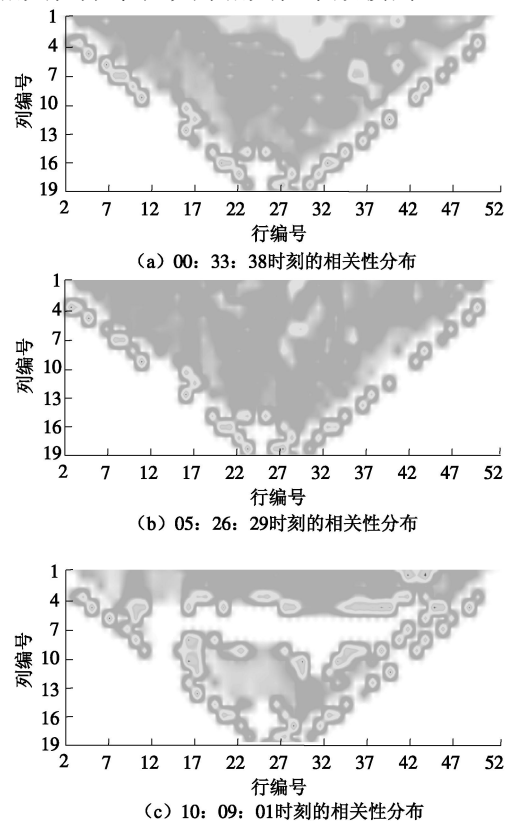


图 13 模型试验突水灾变过程灰度相关性分布

Fig. 13 Gray correlation distribution of water inrush evolution process in model tests

在涌水发生阶段(10:09:01时刻至11:10:44时刻)至08:17:10时刻隧道开挖结束, 隧道内滴水加速, 10:17:02时刻隧道拱顶的防突层(含监测层)出现局部小型坍塌, 形成涌水。随着突水灾变过程的发展, 电阻率监测图像上出现电阻率相对较高的区域, 灰度相关性分布图上对应出现相关性系数较小的区域, 且在突水发生时, 二者图像上均发生了突变。

3.3 隧道突水前兆信息识别与捕捉

应用样本数目与标准方差的统计学方法, 对相关性分布进行进一步定量评价, 同时对电阻率正演图像进行标准差计算, 如图14所示。

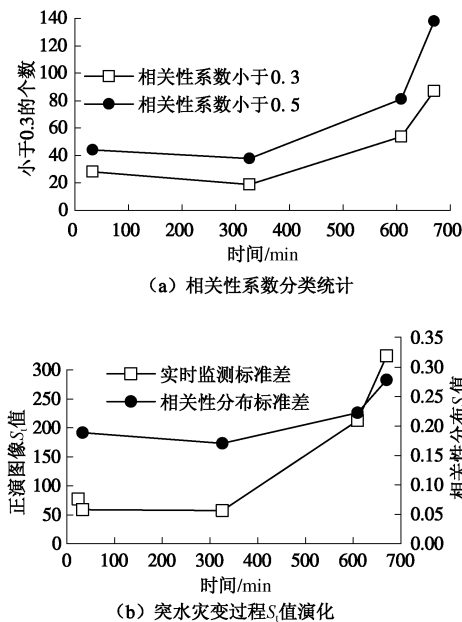


图 14 模型试验突水灾变过程相关性系数统计结果

Fig. 14 Statistical results of relative coefficient during water inrush evolution process in model tests

分析可知, 在渗流稳定阶段, 小于0.5(或0.3)的样本点数增幅较小, 相关性分布 S_d 值和电阻率监测正演图像 S_d 值变化不大。在涌水发生阶段, 至10:09:01时刻, 相关性系数发生突变, 小于0.5(发生变化)的样

本点数增幅达113%，小于0.3（发生较大变化）的样本点数增幅达184%，相关性分布 S_i 值发生突变，增幅达30%，电阻率监测正演图像 S_i 值亦发生突变，增幅达271%，这是重要的突水前兆信息。因此，将10:09:01时刻作为捕捉到确切前兆信息的最早时刻，作出“突水即将发生”的判断和预警，比实际发生突水时刻（10:17:02）提前了8 min，如图15所示，可见电阻率层析成像数据有效地捕捉到涌水的前兆信息。

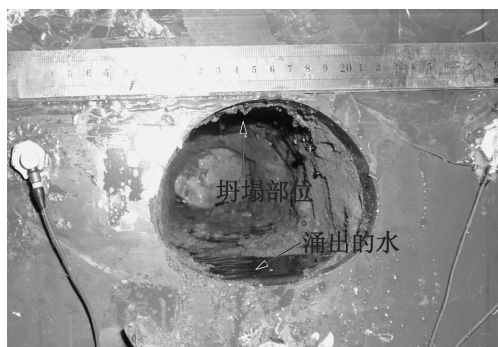


图 15 模型试验涌水照片

Fig. 15 Photo of water inrush in model tests

4 结 论

（1）针对两种典型的隧道突水类型，利用有限单元法进行了电阻率层析成像法数值模拟，基于图像灰度相关性分析的电阻率层析成像法为突水实时监测图像信息变化提供了一种量化评价方法。对突水灾变演化过程电阻率正演图像进行相关性分析，可以定量地表征隧道突水灾变演化过程的发展，改变了以往单纯依靠图像本身解释的定性分析的方法。

（2）在裂隙扩展和突水通道形成过程中，ERT图像中视电阻率数值呈逐渐降低的趋势，表现为低阻区域的扩张；ERT图像形态亦发生相应变化，表现为相关性分布的低相关性区域扩展；相关性系数小于0.5（或0.3）的样本点数渐增大，且相关性分布 S_i 值和电阻率监测正演图像 S_i 值亦逐渐增大，在突水灾害即将发生时，样本点数目和 S_i 值急剧增大，这是突水灾害即将发生的重要前兆。

（3）数值试验和模型试验表明，在突水前电阻率层析成像图像相关性分布图像的样本数目与标准差发生显著变化，有效地捕捉到涌水的前兆信息，且相关性分析关注动态图像的相对变化，与电阻率图像的背景值无关，在背景复杂或有干扰时具有独特的优势。为实际工程中突水灾害的监测与预测提供了重要的参考，但是实际工程中地电条件较为复杂，建议开展对电阻率层析成像法反演图像量化评价方法的研究，并进行现场试验。

参考文献:

- [1] 李术才, 刘 斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1297 - 1309. (LI Shu-cai, LIU Bin, LI Shu-chen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1297 - 1309. (in Chinese))
- [2] ZAREI H R, UROMEIHY A, SHARIFZADEH M. Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 364 - 373.
- [3] LI Xue-ping, LI Yu-nan, ZHOU Shun-ping. Study and application of forecasting system for water inrush under high pressure in Xiamen submarine tunnel construction based on GIS[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(B): 999 - 1005.
- [4] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268 - 277. (YANG Tian-hong, TANG Chun-an, TAN Zhi-hong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268 - 277. (in Chinese))
- [5] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932 - 1938. (JIANG Fu-xing, YE Gen-xi, WANG Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932 - 1938. (in Chinese))
- [6] 李 铁, 纪洪广. 矿井不明水体突出过程的微震辨识技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 134 - 139. (LI Tie, JI Hong-guang. Identification of water inrush process of unknown water body using microseismic monitoring technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 134 - 139. (in Chinese))
- [7] 冯 锐, 郝锦琦, 周建国. 地震监测中的电阻率层析技术[J]. 地球物理学报, 2001, 44(6): 833 - 843. (FENG Rui, HAO Jin-qi, ZHOU Jian-guo. Resistivity tomography in earthquake monitoring[J]. Chinese Journal of geophysics, 2001, 44(6): 833 - 843. (in Chinese))
- [8] ARISTODEMOU E, THOMAS-BETTS A. DC resistivity and

- induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **44**(2/3): 275 – 302.
- [9] PIEGARI E, CATAUDELLA V, MAIO R D, et al. Electrical resistivity tomography and statistical analysis in landslide modelling: a conceptual approach[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, **68**(2): 151 – 158.
- [10] 聂利超, 李术才, 刘 斌, 等. 电阻率层析成像法探测滑坡面正演模拟与反演成像研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(9): 2873 – 2879. (NIE Li-chao, LI Shu-cai, LIU Bin, et al. Numerical forward and inversion imaging research of electrical resistivity tomography method to detection landslide-face location[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(9): 2873 – 2879. (in Chinese))
- [11] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(2): 348 – 356. (LIU Shu-cai, LIU Xin-ming, JIANG Zhi-hai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture floor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(2): 348 – 356. (in Chinese))
- [12] 刘盛东, 王 勃, 周冠群, 等. 基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(2): 267 – 272. (LIU Sheng-dong, WANG Bo, ZHOU Guan-qun, et al. Experimental research on mine floor water hazard early warning based on response of geoelectric field in groundwater seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(2): 267 – 272. (in Chinese))
- [13] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统在矿井突水模型试验中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(2): 297 – 306. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Application of electrical resistivity tomography monitoring system to mine water inrush model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(2): 297 – 306. (in Chinese))
- [14] 张爱华, 王 亮. 基于时变图像序列的脉搏信息提取[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(5): 820 – 825. (ZHANG Ai-hua, WANG Liang. Information detection of pulse wave base on time-varying images[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(5): 820 – 825. (in Chinese))
- [15] 马少鹏, 刘善军, 赵永红. 数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(3): 590 – 595. (MA Shao-peng, LIU Shan-jun, ZHAO Yong-hong. Gray correlation of digital images from loaded rock specimen surface to evaluate its damage evolution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(3): 590 – 595. (in Chinese))
- [16] 雷 冬, 乔丕忠, 李 昂, 等. 岩石动力破坏的高速数字图像相关研究[J]. *煤炭学报*, 2011, **36**(增刊 2): 274 – 277. (LEI Dong, QIAO Pi-zhong, LI Ang, et al. High-speed digital image correlation studies for dynamic damage of rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, **36**(S2): 274 – 277. (in Chinese))
- [17] 邹德蕴, 武 超, 张绪言, 等. 应用岩体电阻率预测岩体失稳的可行性研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, **31**(1): 51 – 54. (ZOU De-yun, WU Chao, ZHANG Xu-yan, et al. Feasibility study of the prediction for rock mass destabilization by applying rock mass resistivity[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2003, **31**(1): 51 – 54. (in Chinese))
- [18] 王俊璇, 赵明阶, 苏初明. 岩石在受载条件下电阻率变化特征研究综述[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2011, **30**(3): 419 – 423. (WANG Jun-xuan, ZHAO Ming-jie, SU Chu-ming. Research review of resistivity variation characteristics under load conditions on rock[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2011, **30**(3): 419 – 423. (in Chinese))
- [19] 张 朋, 王 一, 刘盛东, 等. 工作面底板变形与破坏电阻率特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2011, **39**(1): 64 – 67. (ZHANG Peng, WANG Yi, LIU Sheng-dong, et al. Resistivity characteristic of deformation and failure of floor in workface[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2011, **39**(1): 64 – 67. (in Chinese))
- [20] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. (LI Li-ping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[D]. Ji'nan: Shandong University, 2009. (in Chinese))