

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0117

# 基于多元监测信息融合分析的突水灾害状态判识方法

成 帅, 李术才, 李利平, 石少帅, 周宗青, 袁永才

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 突水灾变演化过程中伴随着防突结构内的岩土体的信息变化, 通过对潜在突水通道围岩多物理场信息进行深度融合分析, 揭示了多元信息的逻辑共生关系, 建立了突水演化状态判识的理论方法。从岩体渐进破坏突水与充填结构失稳突水两种典型的突水相似模型试验入手, 建立了多元监测信息与量化表征函数的关联性。基于主成分分析理论揭示了多参量间的逻辑共生关系, 确定了围岩多物理场信息对突水灾害的影响权重, 这为突水灾害监测设计与预警提供了理论依据。结合函数拟合曲线中表征函数变化趋势发生转变的极值点与驻点, 建立了突水灾害演化状态综合判识方法, 最终将两种突水类型的演化阶段划分为: 平静期、发展期、突变期和灾后期, 并提出了任意时刻下突水灾害发生概率的能量判别方法, 该理论方法为隧道及地下工程突水灾害监测预警提供了参考。

**关 键 词:** 突水; 多元信息; 状态判识; 主成分分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018) 07—2509—09

## Identification method of water inrush status based on multiple monitoring information fusion analysis

CHENG Shuai, LI Shu-cai, LI Li-ping, SHI Shao-shuai, ZHOU Zong-qing, YUAN Yong-cai

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

**Abstract:** The process of water inrush disaster accompanied by the information change of rock and soil within the preventing structure changed accordingly. This study conducted an in-depth fusion analysis of multi-physical field information for potential water inrush channels. The logical symbiosis relationship of multi-information was revealed, and a theoretical method for identifying the evolution state of water inrush was established. Two typical similarity model tests of water inrush were conducted to simulate the progressive failure of rock mass and filling structure instability. Then, we proposed the correlation between the multiple monitoring information and the quantitative characterisation function. Based on the theory of principal component analysis, this study revealed the logical symbiosis relationship between multiple parameters and determined the influence weight of the multi-physical field information in the surrounding rock, which provided a theoretical basis for the monitoring design and early warning of water inrush disaster. A comprehensive method for the evolution state of water inrush disaster was established, combined with the extreme point and the stagnation point of the fitting curve representing the changing trend of the function. Finally, the evolution stages of these two types of water inrush are divided into four periods: calming period, development period, abrupt period and post-disaster period. The energy discrimination method of the occurrence probability of water inrush was put forward at any moment. The theoretical method provides a reference for monitoring and early warning of water inrush disaster in tunnels and underground engineering.

**Keywords:** water inrush; multiple information; status identification; principal component analysis

## 1 引 言

近年来我国的交通隧道工程逐渐向地质环境复

杂的西部地区转移, 隧道工程将穿越地质构造复杂的山区和岩溶地区, 面对大埋深、强岩溶、高水压等挑战, 隧道突水灾害频繁发生<sup>[1-3]</sup>。如: 在建的大

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFC0801607, No. 2016YFC0801604); 国家自然科学基金(No. 51679131, No. 51709159); 山东大学基本科研业务费专项资金资助(No. 2015GN029, No. 2016GN026)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0801607, 2016YFC0801604), the National Natural Science Foundation of China (51679131, 51709159) and the Fundamental Research Funds of Shandong University (2015GN029, 2016GN026).

第一作者简介: 成帅, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程突涌水灾变监测预警方面的研究。E-mail: chengshuaiee@163.com

通讯作者: 李利平, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程突涌水灾变机制的理论及试验研究。E-mail: yuliyangfan@163.com

瑞铁路大柱山隧道全长为 14.5 km, 施工 9 年间突水量高达 1 亿 4 千万方, 原计划 5 年工期因突水灾害频发调整为 13 年。防突结构中的岩土体在突水灾害演化过程中发生着动态变化, 其多物理场的监测信息是突水状态判识的基础。由于隧道施工条件复杂, 无法实现理想的监测环境, 因此, 突水灾害全过程演化的多元信息难以实现工程现场获取。应用于工程现场的突水状态判识方法主要依靠水文地质勘查和地球物理勘探技术<sup>[4-6]</sup>, 而该方法获取的信息相对单一, 无法实现基于多种监测信息的融合分析与综合预警。

相似地质力学模型试验基于相似理论将现场原岩赋存形态还原到室内试验中, 实现岩体破坏全过程模拟, 通过多物理场监测实现对岩体多元信息的准确获取, 地质力学模型试验方法是研究大型岩土问题的一种行之有效的方法<sup>[7]</sup>。研究者们采用模型试验的方法还原了突水灾变过程, 并得出了一些有益的成果。李术才等<sup>[8]</sup>设计了可视化流固耦合模型试验对海底隧道突水进行了还原, 分析了突水过程中围岩位移、渗压、应力等多元信息变化规律。孙文斌等<sup>[9]</sup>基于新研制的相似材料模拟了煤矿底板突水, 揭示了底板突水通道的演化特征。王德明等<sup>[10]</sup>对比分析了突水试验灾变特征与现场实际演化过程, 二者结果较为吻合。刘金泉等<sup>[11]</sup>针对突水突泥过程中的地层颗粒流失进行了试验, 建立了颗粒粒径、颗粒坡面位置、相对暴露度三因素的颗粒启动流速函数。李利平等<sup>[12]</sup>研制了应力-渗流耦合三轴渗透试验系统, 揭示了充填体稳定性和渗透性的变化规律。

然而, 已有成果大多侧重于突水多元信息监测, 而未对多元监测信息融合分析进行深度挖掘, 适用于突水灾害演化状态判识的理论方法尚未建立。基于上述问题, 本文从隧道突水灾害模型试验多元监测信息分析入手, 建立了基于主成分分析与信息函数曲线变化态势的分析方法, 对不同类型的突水灾害演化状态进行了判识, 为突水预警提供理论支撑。

## 2 突水灾害类型

突水灾害是水力耦合共同作用的结果, 涉及复杂的应力、渗流及损伤作用。其致灾结构的赋存环境是诱发突水突泥的客观因素, 而工程施工扰动则是诱发灾变的直接因素。在矿山法隧道施工条件下, 突水灾害位居各类地质灾害首位<sup>[1]</sup>, 这是由于爆破产生的冲击波对岩体造成了极大的破坏, 同时蕴含着巨大能量的灾害水源也会加剧对围岩侵蚀。二者

共同作用下系统能量平衡被打破, 灾害水源会沿着岩体间的原裂隙和共同作用诱发的新生裂隙涌入隧道临空面内。以隧道突水灾害为例, 其空间构造由灾害源、突水通道与防突结构组成<sup>[13]</sup>, 如图 1 所示。

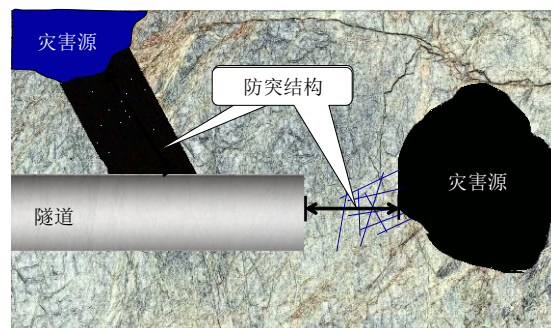


图 1 突水灾害结构

Fig.1 Water inrush disaster structure

在总结分析了典型的隧道突水案例和资料的基础上, 突水灾害概化为岩体渐进破坏突水和充填结构失稳突水两种典型类型和 5 种致灾构造<sup>[14]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 突水构造判别<sup>[14]</sup>

Table 1 Structural discrimination of water inrush<sup>[14]</sup>

| 地质构造                                | 机制与要素                | 判别原理与要点                       |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 富水断裂破碎带<br>(断层、层错带、<br>富水夹泥<br>断裂带) | 内在联通<br>应力状态<br>愈合状况 | 深入内部鉴结构<br>构造组分辨张压<br>不同期次分新老 |
| 夹泥断裂带                               | 母岩泥质<br>层错脱空<br>断裂错动 | 泥岩褶曲易泥化<br>规模错距控泥厚            |
| 深部充水岩溶                              | 饱水带深<br>湿热环境         | 山体排口水位明                       |
| 充水充泥<br>岩溶体                         | 可溶岩性<br>张裂先导         | 地理地质敏感区张<br>性裂隙为先导            |
| 充填岩溶洞穴                              | 充泥状态<br>三相转化         | 来源状态三相流                       |

防突结构是灾害源与隧道临空面之间具有隔水阻泥作用的岩土体结构, 是保障隧道安全的最后屏障。由于防突结构水文地质条件的差异性, 导致了突水通道演化模式的不同。岩体渐进破坏突水常发生于结构相对完整的岩体中, 且附近不存在明显的地质缺陷, 突水通道以高地应力、水压力及施工扰动诱发的新生裂隙为主, 突水通道一旦贯通防突结构, 便会造成高压大体量水体涌出。充填结构失稳突水常发生于软弱破碎层及构造充填介质组成的岩土体中, 强度较低、结构排列稀松的充填介质为突水通道孕育提供了便利, 由于组成充填介质的岩土体粒径不均匀, 在突水通道演化历经颗粒流失、局

部搬移、冲刷扩径与骨架失稳阶段, 发生类似管涌现象, 最终导致充填结构失稳突水。

### 3 突水灾害全过程演化信息

为了探究突水灾害演化全过程多元信息变化规律, 开展两种不同的突水灾害类型的相似模型试验<sup>[15]</sup>。针对岩体渐进破坏突水通过监测潜在突水通道附近岩体的应力、位移、声发射及渗压信息, 获取了岩体裂纹萌生、扩展直至联通形成突水通道全过程的演化信息。针对不同渗透特性的充填介质开展了相似模型试验, 采集了充填介质颗粒启动流失直至骨架颗粒失稳的多物理场变化信息。

#### 3.1 归一化分析

突水灾害多物理场监测将产生大量数据, 为了消除多元信息量纲和取值范围的差异, 需对多元信息进行归一化处理。经归一化转换后的数据在 0~1 范围之内, 消除量纲影响的同时又能够凸显物理量的变化规律。常用的数据归一化算法有线性函数转换、反正切函数转换、对数函数转换和零-均值归一化 4 种算法, 而其中的线性函数转换算法处理的各物理量变化趋势与原始数据吻合度较好, 能够准确的原始数据曲线中的波动以及突增等关键信息<sup>[16-17]</sup>。

按照时间采集顺序将各监测数据组成矩阵, 矩阵值域为 $[min, max]$ , 则线性函数转换归一化表达式为

$$\varphi_k(x) = \frac{x - min}{max - min} \quad (1)$$

式中:  $k$  值为多参量的个数;  $\varphi_k(x)$  是监测数据  $k$  的线性函数。线性函数转换归一化能够保持监测数据大小关系保持不变, 若  $x_1 < x_2$ , 则满足  $\varphi_k(x_1) < \varphi_k(x_2)$ ; 同时监测数据之间的相对距离保持不变, 若  $d_1 = |x_1 - x_2|$ ,  $d_2 = |x_3 - x_4|$ ,  $d'_1 = |\varphi_k(x_1) - \varphi_k(x_2)|$ ,  $d'_2 = |\varphi_k(x_3) - \varphi_k(x_4)|$ , 则  $d_1 : d_2 = d'_1 : d'_2$ 。

袁永才<sup>[15]</sup>分别针对岩体渐进破坏与充填结构失稳两种突水类型开展了相似模型试验, 并基于线性函数转换算法对突水灾害前兆信息监测数据进行归一化转换, 如图 2 与图 3 所示。

对比分析图 2 与图 3 可知, 突水全过程中岩体监测值均出现持续平稳变化后到极剧陡升或者下降现象, 根据图示信息变化趋势将突水灾害全过程划分为 4 个时期: 平静期、发展期、突变期和灾后期。平静期内岩体各监测信息相对稳定, 此时防突结构内岩土体处于应力平衡状态, 突水通道尚未发育。发展期内岩土体内部裂隙开始萌生, 但防突结构尚

未达到最小安全厚度极限, 各信息虽然有所变化但未达到突水临界阈值。突变期的防突结构各个物理场信息发生突变, 岩土体间潜在的突水通道可能在此阶段任意一瞬间贯通。灾后期内供灾害源流通的突水通道已经形成, 灾害水源沿着突水通道瞬间涌入隧道临空面内, 灾后期是能量平衡被打破后二次重平衡的过程。

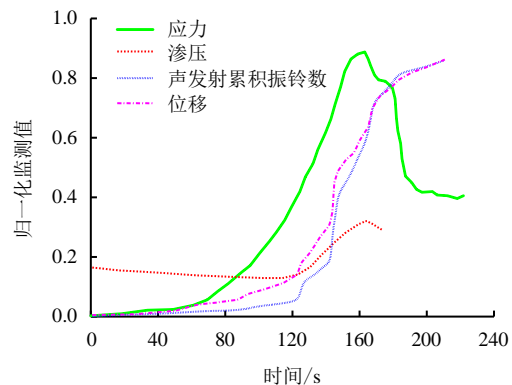


图 2 充填结构失稳突水前兆信息<sup>[15]</sup>

Fig.2 Precursor information of filling structure instability water inrush<sup>[15]</sup>

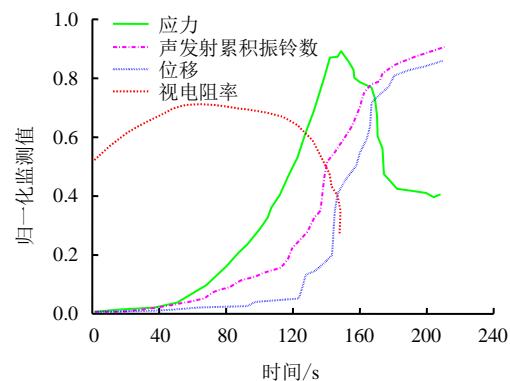


图 3 岩体渐进破坏突水前兆信息<sup>[15]</sup>

Fig.3 Precursory information of progressive failure of rock mass water inrush<sup>[15]</sup>

#### 3.2 多元信息函数拟合

为了量化多元信息的演化特征, 建立函数拟合的数学模型表征多元信息的变化态势。拟合函数应遵循监测信息还原, 并能够准确反映监测数据随时间变化趋势的原则。

基于有理数函数对充填结构失稳突水的多元信息进行拟合, 拟合函数表达式为

$$f_i(x) = \frac{\sum_{j=1}^{n+1} p_{ij} x^{n+1-j}}{x^m + \sum_{j=1}^m q_{ij} x^{m-j}} \quad (2)$$

式中:  $m$ 、 $n$  分别为分母和分子中最高次  $x$  项的次数;  $f_1(x)$  是应力曲线函数,  $f_2(x)$  是渗压函数,  $f_3(x)$  是声发射函数,  $f_4(x)$  是位移函数, 拟合函数曲线参数

如表 2 所示。 $i=1, 2, 3, 4; j=1, 2; p_{ij}, q_{ij}$  为  $x$  项的系数, 它们的值为

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.044\ 06 & -7.297 & 1\ 142 & 0 \\ -3.647 \times 10^{-4} & 0.290\ 5 & -60.16 & 3\ 891 \\ 2.525 \times 10^{-3} & -0.603\ 7 & 40.23 & -405.9 \\ 2.021 \times 10^{-3} & -0.401\ 9 & 23.35 & -61.93 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} -311.3 & 2.55 \times 10^4 \\ -304.8 & 2.381 \times 10^4 \\ -292.9 & 2.284 \times 10^4 \\ -287.8 & 2.313 \times 10^4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表 2 拟合函数参数  
Table 2 Parameter of fitting function

| $i$ | $m$ | $n$ | $R^2$   |
|-----|-----|-----|---------|
| 1   | 2   | 2   | 0.977 2 |
| 2   | 2   | 3   | 0.991 3 |
| 3   | 2   | 3   | 0.998 1 |
| 4   | 2   | 3   | 0.993 9 |

注:  $R^2$  为决定系数。

充填结构失稳突水试验中多元信息拟合函数曲线如图 4 所示, 拟合曲线与监测数据曲线相似度极高, 决定系数  $R^2$  如表 2 所示。

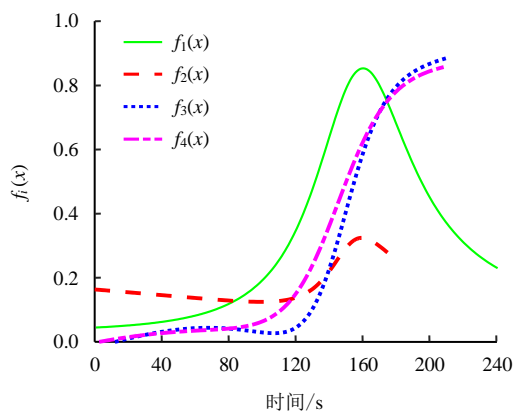


图 4 充填结构失稳突水多元信息拟合曲线  
Fig.4 Multivariate information fitting curve of filling structure instability water inrush

基于有理数函数对岩体渐进破坏突水多元信息进行拟合, 拟合函数表达式为

$$g_i(x) = \frac{\sum_{j=1}^{n+1} p_{ij} x^{n+1-j}}{x^m + \sum_{j=1}^m q_{ij} x^{m-j}} \quad (5)$$

式中:  $g_1(x)$  是应力曲线函数,  $g_2(x)$  是声发射函数,  $g_3(x)$  是位移函数,  $g_4(x)$  是视电阻率函数, 拟合函数曲线参数如表 3 所示。其中参数  $p_{ij}, q_{ij}$  分别为

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.044\ 06 & -7.297 & 1\ 142 & 0 \\ 0.002\ 251 & -0.499\ 4 & 34.66 & -306.7 \\ 0.001\ 85 & -0.378\ 6 & 21.87 & -105.1 \\ -0.002\ 173 & 1.601 & -145 & -765\ 6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} -311.3 & 2.55 \times 10^4 \\ -286.4 & 2.253 \times 10^4 \\ -298.7 & 2.437 \times 10^4 \\ -66.93 & -1.53 \times 10^4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

表 3 拟合函数参数  
Table 3 Parameter of fitting function

| $i$ | $m$ | $n$ | $R^2$   |
|-----|-----|-----|---------|
| 1   | 2   | 2   | 0.977 2 |
| 2   | 2   | 3   | 0.991 3 |
| 3   | 2   | 3   | 0.998 0 |
| 4   | 2   | 3   | 0.981 7 |

充填结构失稳突水试验中多元信息拟合函数曲线如图 5 所示, 拟合曲线与监测数据曲线相似度极高, 决定系数  $R^2$  如表 3 所示。

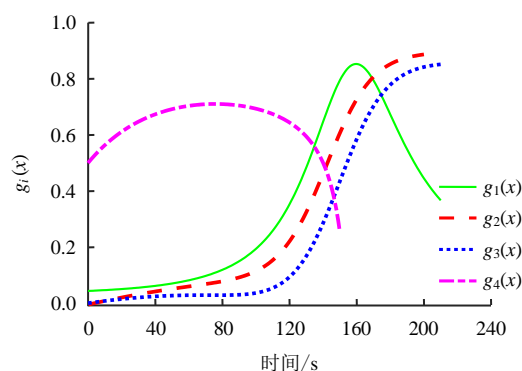


图 5 岩体渐进破坏突水多元信息拟合曲线  
Fig.5 Multivariate information fitting curve of progressive failure of rock mass water inrush

最终, 两种突水类型下的潜在突水通道围岩内多元信息以函数的形式得以表征, 应用函数数学模型分析多元信息演化规律是突水灾害监测预警的有效手段。

## 4 突水多元信息演化规律

### 4.1 多元信息逻辑共生关系

主成分分析是通过降维来简化数据结构的方法, 将不同突水类型下具有一定相关性的多物理场参量转化为一组新的互相无关的变量进行描述, 而新变量可以反映原来多个变量的大部分信息<sup>[18]</sup>, 计算流程如图 6 所示。

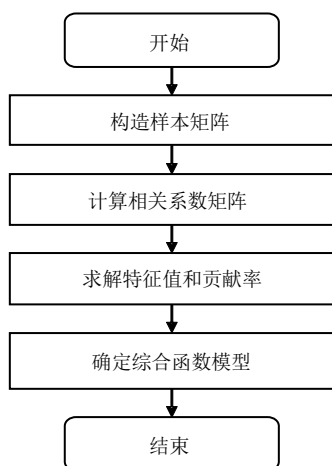


图6 突水各参量权重确定流程图

Fig.6 Weight determination flow chart of each parameter in water inrush

## 4.1.1 构造样本矩阵

组成样本矩阵的数据为归一化后的多元信息值。首先，分别比较不同突水类型下多参量拟合函数定义域，以定义域长度最小的函数作为样本空间大小选取的基准，等间距取同时刻下多元信息函数值组成样本矩阵。令充填结构失稳突水多参量拟合函数定义域为[0, 175]，岩体渐进破坏突水多参量拟合函数定义域为[0, 150]。样本矩阵空间越大对多元信息的变化特性刻画越细致，也就意味着样本矩阵元素从函数中取样时应尽可能的缩短时间步长满足精细化的要求。综合考虑到计算效率和计算精度的因素，本文分别设定时间步长为2.0、1.0、0.5来构造样本矩阵进行试算，对比由此求得的相关系数矩阵中元素的误差，结果表明时间步长为1.0时求得的相关系数矩阵各元素误差低至0.1%，满足了较高的计算精度。以时间步长1.0为单位等间距取 $f_i(x)$ 和 $g_i(x)$ 函数值，组成样本矩阵 $F$ 和样本矩阵 $G$ 。

$$F = (x_1, x_2, x_3, x_4) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.044\ 8 & 0.163\ 4 & -0.017\ 8 & -0.002\ 7 \\ 0.045\ 0 & 0.163\ 0 & -0.016\ 2 & -0.001\ 7 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.737\ 1 & 0.278\ 5 & 0.760\ 3 & 0.751\ 4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $F$ 为 $4 \times 176$ 的矩阵；向量 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 分别为应力、渗压、声发射、位移函数值。

$$G = (x_1, x_2, x_3, x_4) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.044\ 8 & -0.013\ 6 & -0.004\ 3 & 0.500\ 4 \\ 0.045\ 0 & -0.012\ 3 & -0.003\ 5 & 0.507\ 6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.796\ 0 & 0.605\ 3 & 0.436\ 2 & 0.252\ 6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $G$ 为 $4 \times 151$ 的矩阵；向量 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 分别为应力、声发射、位移、视电阻率函数值。

## 4.1.2 计算相关系数矩阵

计算样本矩阵 $F$ 和样本矩阵 $G$ 的相关系数矩阵，即

$$\rho_F = \begin{bmatrix} 1 & 0.874\ 5 & 0.902\ 3 & 0.965\ 0 \\ 0.874\ 5 & 1 & 0.769\ 0 & 0.815\ 0 \\ 0.902\ 3 & 0.769\ 0 & 1 & 0.981\ 2 \\ 0.965\ 0 & 0.815\ 0 & 0.981\ 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\rho_G = \begin{bmatrix} 1 & 0.995\ 7 & 0.961\ 9 & -0.663\ 0 \\ 0.995\ 7 & 1 & 0.979\ 2 & -0.668\ 9 \\ 0.961\ 9 & 0.979\ 2 & 1 & -0.767\ 1 \\ -0.663\ 0 & -0.668\ 9 & -0.767\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 4.1.3 求解特征值和贡献率

由以下两式可求得相关系数矩阵 $\rho_F$ 的特征值 $\lambda_j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ )与方差贡献率。为了使主成分函数尽量多地反映样本数据特征，特征值选取应当遵循数值大、贡献率高的原则，特征值阈值通常选取1，累积贡献率阈值为85%<sup>[19-20]</sup>。

$$|\rho_F - \lambda E| = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^4 \lambda_j} \geq 85\% \quad (13)$$

式中： $E$ 为单位矩阵。根据上述方法能够求出了相关系数矩阵 $\rho_G$ 的特征值( $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8$ )及贡献率，如表4所示。

表4 相关系数矩阵特征值及贡献率

Table 4 Eigenvalues of correlation coefficient matrix and contribution rate

| 充填结构失稳突水相<br>关系数矩阵特征值 $\lambda_j$ | 贡献率<br>/% | 岩体渐进破坏突水相<br>关系数矩阵特征值 $\lambda_j$ | 贡献率<br>/% |
|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| 3.790 7                           | 94.767 9  | 3.562 9                           | 89.072 3  |
| 0.128 4                           | 3.209 7   | 0.412 9                           | 10.323 0  |
| 0.079 2                           | 1.980 4   | 0.024 1                           | 0.602 4   |
| 0.001 7                           | 0.042 0   | $9.116\ 0 \times 10^{-5}$         | 0.002 3   |

根据主成分分析原理特征值选取原则，确定了两种突水类型下多参量的主成分函数均为一个。特征向量表示主成分与多个参量间的关系，主成分因子荷载为特征值 $\lambda_j$  ( $j=1, 2, \dots, 8$ )对应的特征向量的系数，如表5所示。



表5 主成分因子荷载

Table 5 Principal component factor load

| 充填结构失稳突水 |            | 岩体渐进破坏突水                 |            |
|----------|------------|--------------------------|------------|
| 特征值      | 因子荷载 $h_1$ | 特征值                      | 因子荷载 $h_5$ |
| 3.790 7  | 0.492 5    | 3.562 9                  | 0.514 5    |
| 0.128 4  | 0.495 9    | 0.412 9                  | 0.518 2    |
| 0.079 2  | 0.500 6    | 0.024 1                  | 0.525 3    |
| 0.001 7  | 0.510 8    | $9.116 0 \times 10^{-5}$ | -0.436 9   |

## 4.1.3 综合函数模型

综合函数表达形式为

$$H = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \quad (14)$$

以充填结构失稳突水为例, 系数  $a_j$  值为各主因子荷载与方差贡献率乘积的累加和与方差累积贡献率的比值,  $a_j$  值为

$$a_j = \frac{h_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}} \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} \quad (i=1, 5; j=1, 2, 3, 4) \quad (15)$$

最终充填结构失稳突水对应的综合函数模型  $H_1$  和岩体渐进破坏突水对应的综合函数模型  $H_2$  表达式为

$$H_1 = 0.240x_1 + 0.241x_2 + 0.244x_3 + 0.249x_4 \quad (16)$$

$$H_2 = 0.235x_1 + 0.237x_2 + 0.240x_3 - 0.200x_4 \quad (17)$$

由综合函数模型可得到各参量权重确定表, 如图7所示。

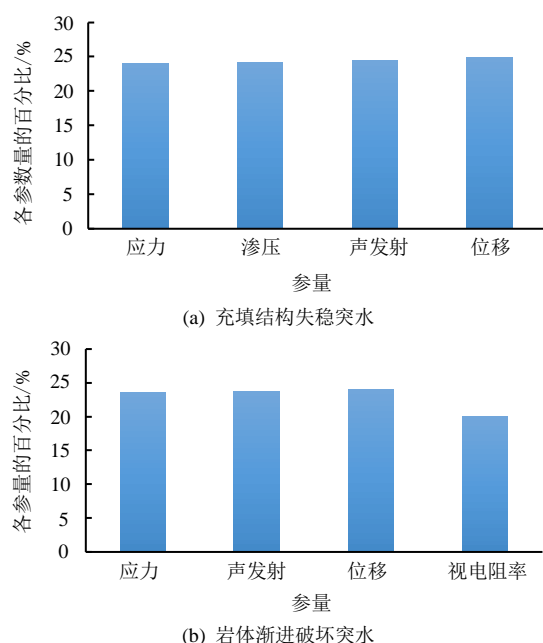


图7 不同突水类型下各参量权重

Fig.7 Weights of each parameter under different water inrush types

分析图可知, 主成分函数  $H_1$  中岩体的应力场、渗压场、声发射场和位移场受到充填结构失稳突水的影响相对均衡, 充填结构失稳演化过程中各项指标受到的影响由强到弱分别为: 位移、声发射、渗压、应力 (见图 7(a))。主成分函数  $H_2$  中岩体视电阻率变化趋势与应力、声发射和位移变化相反且权重最低, 各项指标对岩体渐进破坏水贡献率由高到低依次为: 位移、声发射、应力、视电阻率值 (见图 7(b))。分析对比两种突水类型下主成分函数可知, 组成防突结构的岩体多物理场均受到了几乎相同程度的影响, 影响程度由高到低依次为: 位移、声发射、应力, 这为突水灾害监测设计提供了借鉴。

## 4.2 突水演化状态判别

基于主成分分析方法确定了多元信息对不同类型突水的权值, 这为突水演化状态阶段性划分提供了理论支撑。函数曲线在极值点和驻点处态势发生转变, 因此, 函数的极值点与驻点可作为突水灾害状态划分的依据。分别对两种不同类型下的突水灾害信息函数进行了导函数变换, 如图8和图9所示。

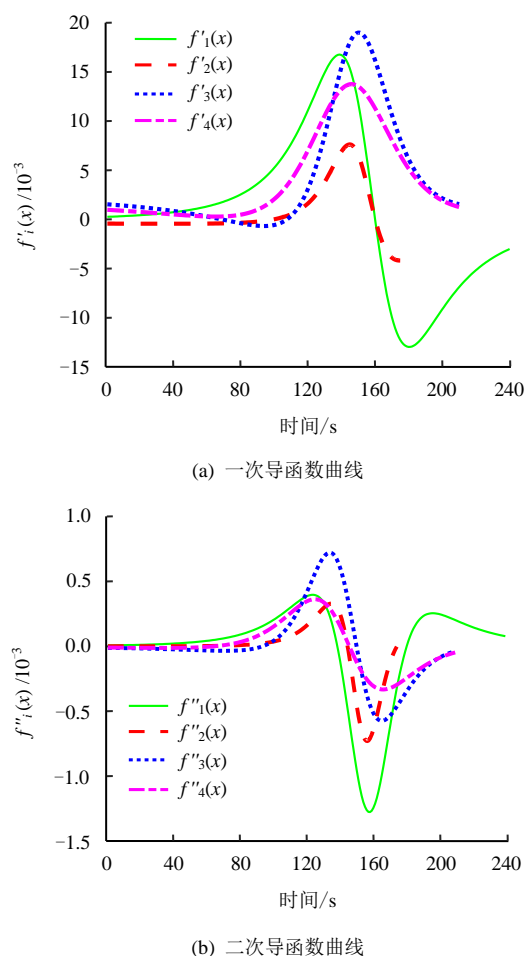


图8 充填结构失稳突水多元信息导函数曲线

Fig.8 Multivariate information derivative curves of filling structure instability water inrush

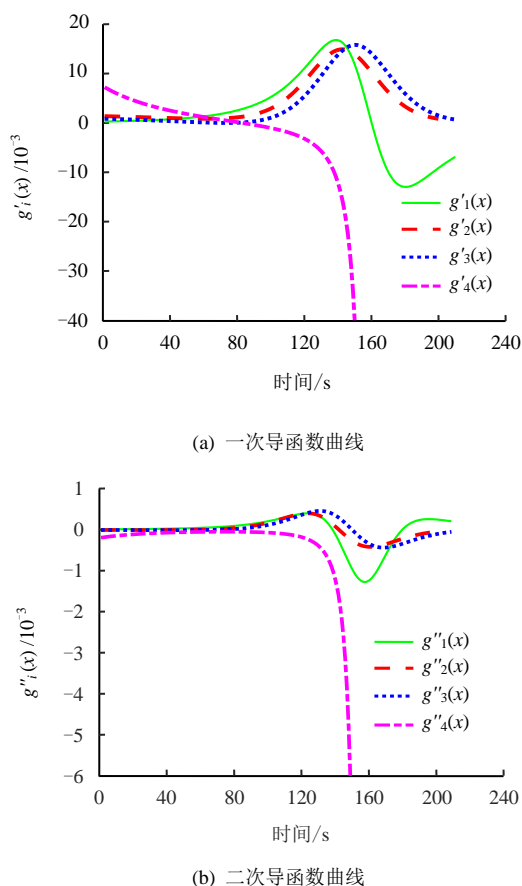


图 9 岩体渐进破坏突水多元信息导函数曲线

Fig.9 Multivariate information derivative curves of progressive failure of rock mass water inrush

对比分析图 4 和图 8(a)可知,  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$  曲线存在极大值点, 因此, 将应力和渗压函数极大值点对应时刻作为突水灾害突变期与灾后期的分水岭。临界点满足  $f'_1(x)$ 、 $f'_2(x)$  为 0, 且在 0 点邻域内一次导函数由正变负。分析图 8(b)知, 多元信息函数曲线在陡增过程中存在增长率减小的情况, 即由下凸函数变成上凸函数的变化。函数出现凹凸性转变的时刻 (函数驻点) 是突水灾害的发展阶段与爆发阶段的临界点, 它满足  $f''_1(x)=0$ , 且在 0 点邻域内二次导函数由正变负。对于 (某段) 曲线变化趋势不明显的函数寻找其极值点和驻点的方式不再适用, 取  $f_i(x)$  函数在该监测时间段内值域范围的等分点对应的时刻作为临界值。鉴于突水过程中各监测参数的权重不同, 将每个信息函数求得的 4 个阶段临界点赋予不同的权重进行修正, 最终充填结构失稳突水演化状态判识情况, 如表 6 所示。

结合图 9 中拟合函数的一次导函数和二次导数变化态势, 又根据上述函数 0 点及拐点的判定方法实现了突水前不同时期的临界时间值的确定。最终, 岩体渐进破坏突水的状态判识情况如表 7 所示。

通过主成分分析与函数曲线变化特性的综合分析, 划分了充填结构失稳突水与岩体渐进破坏突水的状态, 在图 10 中采用不同颜色对突水演化 4 个时期进行描绘。

表 6 充填结构失稳突水状态判识

Table 6 Status identification of filling structure instability water inrush

| 类别       | 平静期/s    | 发展期/s      | 灾变期/s      | 灾后期/s      |
|----------|----------|------------|------------|------------|
| $f_1(x)$ | [0, 113) | [113, 138) | [138, 160) | [160, 240) |
| $f_2(x)$ | [0, 98)  | [98, 144)  | [144, 159) | [159, 175) |
| $f_3(x)$ | [0, 69)  | [69, 149)  | [149, 165) | [165, 210) |
| $f_4(x)$ | [0, 128) | [128, 145) | [145, 162) | [162, 210) |
| 修正值      | [0, 102) | [102, 143) | [143, 161) | [161, 240) |

表 7 岩体渐进破坏突水状态判识

Table 7 Status identification of progressive failure of rock mass water inrush

| 类别       | 平静期/s    | 发展期/s      | 灾变期/s      | 灾后期/s      |
|----------|----------|------------|------------|------------|
| $g_1(x)$ | [0, 113) | [113, 138) | [138, 160) | [160, 240) |
| $g_2(x)$ | [0, 121) | [121, 142) | [142, 155) | [155, 200) |
| $g_3(x)$ | [0, 69)  | [69, 149)  | [149, 164) | [164, 210) |
| $g_4(x)$ | [0, 19)  | [19, 141)  | [141, 150) |            |
| 修正值      | [0, 82)  | [82, 142)  | [142, 156) | [156, 240) |

基于多元监测参数变化态势融合分析, 实现了突水各个阶段的量化表述。两种典型类型的突水在平静期与发展期所占有的比例较大, 属于突水灾变能量的积蓄阶段。而灾变期的岩体极不稳定且时间较短, 围岩多物理场监测参数在这一阶段累积达到岩体承受极限。因此, 可以将平静期、发展期与灾变期岩体的变化信息作为突水灾害预警的前兆多元信息, 以多元信息函数在时间域的积分作为能量值, 那么突水灾害发生概率可用前兆多元信息能量值在总能量中的占有率表示, 任一时刻下突水发生概率  $P(t)$  (以充填结构失稳突水为例) 为

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 \int_0^t f_i(x) dx}{\sum_{i=1}^4 \int_0^T f_i(x) dx} \quad (18)$$

式中:  $T$  为突水灾变期与灾后期的时间临界值。将不同的多元信息函数与突水前 3 阶段临界值分别代入式 (18) 中, 可以求解充填结构失稳和岩体渐进破坏两类突水在平静期、发展期与灾变期灾害发生概率, 如表 8 所示。

本文将多物理场信息对突水灾害的影响权重、监测数据的变化趋势作为突水状态判断的准则, 前者用于衡量多物理场信息对突水灾害贡献率, 后者是突水灾变全过程时间判识的依据。该融合分析方

法适用于充填结构失稳突水和岩体渐进破坏突水模型试验,同时也为类似突水模型试验和工程现场监测数据的融合分析提供了参考。

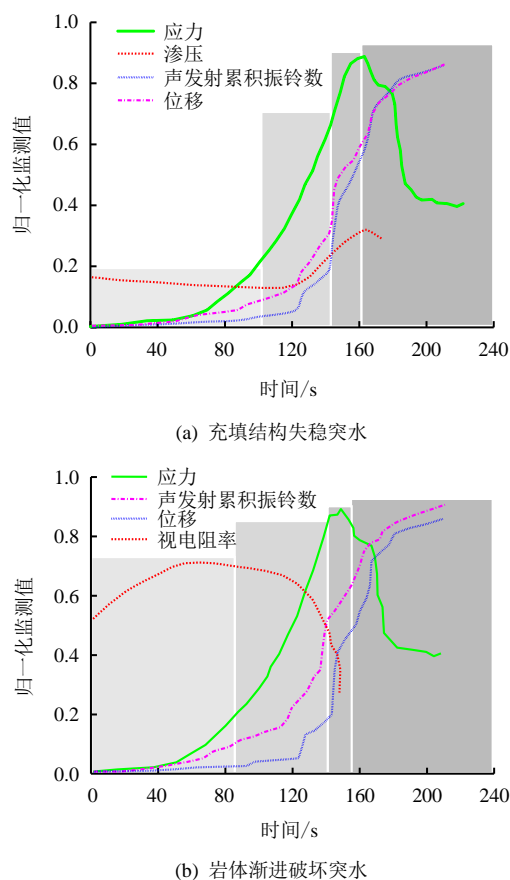


图 10 不同突水类型演化状态

Fig.10 Evolution states of different water inrush types

表 8 不同突水类型下各演化状态的突水概率

Table 8 Water inrush probabilities of each evolution state in different water inrush types

| 时期  | 突水类型     | 能量值      | 突水概率/% |
|-----|----------|----------|--------|
| 平静期 | 充填结构失稳突水 | 29.242 4 | 29.01  |
|     | 岩体渐进破坏突水 | 63.352 3 | 37.83  |
| 发展期 | 充填结构失稳突水 | 34.504 1 | 63.24  |
|     | 岩体渐进破坏突水 | 75.807 8 | 83.11  |
| 灾变期 | 充填结构失稳突水 | 37.055 3 | 100.00 |
|     | 岩体渐进破坏突水 | 28.289 1 | 100.00 |

## 5 结 论

(1) 本文采用函数拟合的方法实现了两种突水下多元监测信息的量化表征,结合突水多物理场监测参量变化与突水演化机制,将突水全过程划分为:平静期、发展期、灾变期和灾后期。

(2) 本文从多元信息函数入手对多元信息的逻辑共生关系进行了融合分析,基于主成分分析理论确定了不同类型下各物理场信息对突水灾害的影响

权重,这为突水监测设计及突水发生概率预警提供了依据。

(3) 本文通过多元信息函数极值点与驻点分析,建立了基于多元信息函数势态变化与各参量贡献率的综合分析方法,实现了突水演化状态阶段性判识,并基于能量理论确定了任意时刻下突水灾害发生概率,该理论方法为类似突水模型试验和工程现场监测数据的融合分析提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945—1956.  
QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945—1956.
- [2] LI S C, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 38: 50—58.
- [3] 李术才, 周宗青, 李利平, 等. 岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1858—1867.  
LI Shu-cai, ZHOU Zong-qing, LI Li-ping, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1858—1867.
- [4] 施龙青, 谭希鹏, 王娟, 等. 基于 PCA\_Fuzzy\_PSO\_SVC 的底板突水危险性评价[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 167—171.  
SHI Long-qing, TAN Xi-ping, WANG Juan, et al. Risk assessment of water inrush based on PCA\_Fuzzy\_PSO\_SVC[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(1): 167—171.
- [5] LI S, LIU B, NIE L, et al. Detecting and monitoring of water inrush in tunnels and coal mines using direct current resistivity method: a review[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2015, 7(4): 469—478.
- [6] 薛翊国, 李术才, 张庆松, 等. 隧道信息化施工岩溶裂隙水超前地质预报[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3360—3364.  
XUE Yi-guo, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Geological prediction of karst-fractured groundwater in tunnel informational construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3360—3364.
- [7] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3785—



3789.  
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3785—3789.
- [8] 李术才, 王凯, 李利平, 等. 海底隧道新型可拓展突水模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2409—2418.  
LI Shu-cai, WANG Kai, LI Li-ping, et al. Development and application of an extendable model test system for water inrush simulation in subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2409—2418.
- [9] 孙文斌, 张士川, 李杨杨, 等. 固流耦合相似模拟材料研制及深部突水模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2665—2670.  
SUN Wen-bin, ZHANG Shi-chuan, LI Yang-yang, et al. Development application of solid-fluid coupling similar material for floor strata and simulation test of water-inrush in deep mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 2665—2670.
- [10] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 断层破碎带隧道突水突泥灾变演化模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2851—2860.  
WANG De-ming, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2851—2860.
- [11] 刘金泉, 杨典森, 陈卫忠, 等. 全风化花岗岩突水通道扩展的颗粒起动流速研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1179—1187.  
LIU Jin-quan, YANG Dian-sen, CHEN Wei-zhong, et al. Research on particle starting velocity in the expansion of water inrush channel in completely weathered granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 1179—1187.
- [12] 李利平, 柳尚, 李术才, 等. 应力-渗流耦合三轴渗透试验系统研制及其在充填介质渗透特性试验中的应用[J]. 岩土力学, 2017, (10): 3053—3061.  
LI Li-ping, LIU Shang, LI Shu-cai, et al. Development of testing system for coupled seepage and triaxial stress measurements and its application to permeability characteristic test on filling medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, (10): 3053—3061.
- [13] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22—30.  
LI Shu-cai, WANG Kang, LI Li-ping, et al. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disaster in karst tunnels[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2017, 49(1): 22—30.
- [14] 李术才, 李晓昭, 靖洪文, 等. 深长隧道突水突泥重大灾害致灾机理及预测预警与控制理论研究进展[J]. 中国基础科学, 2017, 19(3): 27—43.  
LI Shu-cai, LI Xiao-zhao, JING Hong-wen, et al. Research development of catastrophe mechanism and forecast controlling theory of water inrush and mud gushing in deep long tunnel[J]. **China Basic Science**, 2017, 19(3): 27—43.
- [15] 袁永才. 隧道突涌水前兆信息演化规律与融合预警方法及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
YUAN Yong-cai. Study on Precursor Information Evolution Law of Water Inrush and Early Warning Method in Tunnels and its Engineering Applications[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [16] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 矿井顶板突水模型试验多场信息的归一化处理方法[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 447—451.  
LI Shu-chen, FENG Xian-da, LI Shu-cai, et al. Thenormalization process of the multi-field information from a coal mine water-inrush model test[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(3): 447—451.
- [17] 梁光明, 唐玉鹏, 孙即祥. 基于概率分布均衡技术的归一化算法及在模式识别中的应用[J]. 信号处理, 2009, 25(4): 636—638.  
LIANG Guang-ming, TANG Yu-peng, SUN Ji-xiang. Normalization algorithm based on the technology of probability distribution equalization and its application in pattern recognition[J]. **Signal Processing**, 2009, 25(4): 636—638.
- [18] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25—31.  
LIN Hai-ming, DU Zi-fang. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis[J]. **Statistical Research**, 2013, 30(8): 25—31.
- [19] 骆行文, 姚海林. 基于主成分分析的岩石质量综合评价模型与应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 452—455.  
LUO Xing-wen, YAO Hai-lin. A model for comprehensively evaluating rock quality base on principal component analysis and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 452—455.
- [20] 高凌霄, 栾茂田, 杨庆. 基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1921—1926.  
GAO Ling-xia, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Evaluation of loess collapsibility based on principal components of microstructural parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 1921—1926.