

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003024

基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

赵瑞珏¹, 毛德强¹, 刘再斌^{2,3}, 姬中奎², 曹祖宝²

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 水文地质参数是衡量含水层富水性的重要指标, 其空间分布特征的准确推算, 对于矿井突水灾害预报与防治具有积极意义。传统放水试验分析方法得到的是等效水文地质参数, 不能准确刻画含水层的空间异质性。基于随时间变化的水头数据与水文地质参数的互相关分析, 将水力层析法应用在陕西榆林柠条塔煤矿井下承压含水层叠加放水试验数据分析中, 获得了研究区水文地质参数的空间分布特征。结果表明, 工作面南北富水性差异大, 涌水区位于强导水带上; 从涌水区往北, 导水系数和储水系数整体上逐渐减小; 南部导水系数和储水系数均较大, 属于富水异常区。研究表明, 水力层析法是一种有效的非均质含水层参数识别的新技术, 将井下水头视为针对含水层的刺激源, 结合水头与水文地质参数的互相关分析, 联合多个观测孔的水头响应数据, 反演刻画研究区域的主要地质结构特征。在矿井水文地质条件分析中, 预先采用水力层析法识别富水异常区域, 可以有效降低突水事故风险。

关键词: 水力层析法; 放水试验; 互相关分析; 矿井突水; 煤矿承压含水层; 富水异常区

中图分类号: P641.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0001-09

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography

ZHAO Ruijue¹, MAO Deqiang¹, LIU Zaibin^{2,3}, JI Zhongkui², CAO Zubao²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Hydrogeological parameters are important indices to evaluate water-yielding conditions of an aquifer, and an accurate delineation of their spatial distribution is of significance for the prediction and prevention of water-inrush incidents in underground mines. Hydrogeological parameters obtained by traditional water-releasing tests analyses are equivalent values, and the spatial heterogeneity cannot be accurately characterized. Based on cross-correlation analyses between time-dependent head data and hydrogeological parameters, hydraulic tomography is applied to interpret underground sequential water-releasing tests of confined aquifers in the Ningtiaota coal mine in Yulin of Shaanxi, and the spatial distribution of hydrogeological parameters in the study area is also analyzed. The results show that there is a great difference between the northern and southern parts of the working face, and the water-inrush area is located on a highly permeable zone. The transmissivity and storativity gradually decrease from the water-inrush area to the north. The magnitudes of both the transmissivity

收稿日期: 2020-03-14; 修订日期: 2020-04-15

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2019MEE109); 国家重点研究开发项目(2017YFC0804100)

第一作者: 赵瑞珏(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质研究。E-mail: 872183948@qq.com

通讯作者: 毛德强(1981-), 男, 教授, 主要从事水文地球物理研究。E-mail: maodeqiang@email.sdu.edu.cn

and storativity are high in the southern part, which indicates a water-yielding abnormal area. In conclusion, we note that the hydraulic tomography is an efficient technique for identifying the heterogeneous aquifer parameters. Underground water-releasing can be regarded as a stimulus source for aquifers. The head data and cross-correlation analyses between the head data and hydrogeological parameters are used to obtain the main geological structural characteristics of the study area. In the analyses of hydrogeological conditions of underground mines, identification of water-yielding abnormal areas by hydraulic tomography in advance can effectively reduce the risk of water-inrush incidents.

Keywords: hydraulic tomography; water-releasing tests; cross-correlation analysis; mine water-inrush; confined aquifer; water-yielding abnormal areas

在煤炭开采的过程中, 矿井突水事故是影响安全生产的重要因素之一^[1]。为了探明同一含水层内部或不同含水层之间的水力联系, 深入了解含水层富水性以及补给、径流、排泄条件, 通常进行同一矿区大流量、大降深、大范围的放水试验^[2-3]。查清本井田及相邻井田的水文地质条件, 为煤矿安全生产提供技术保障^[4]。

传统放水试验分析方法得到的含水层水文地质参数是含水层的等效参数, 不能准确刻画参数的空间异质性。邵红旗等^[5]提出了以水量衰减率、单位涌水量的水位降深值及水位恢复速率为主要指标的放水试验分析方法; 曹祖宝等^[6]利用“大井法”分析放水试验, 得到的水文地质参数是含水层的等效参数。

水力层析法是基于抽水或注水试验的改进方法, 通过一系列交叉抽水或注水试验, 运用水头响应数据, 识别含水层水文地质参数的空间分布特征^[7]。在同样抽水井数量的情况下, 水力层析法能够获得更多有关含水层的水头响应数据, 分析结果能够更加准确地反映含水层水文地质参数的空间分布特征, 求解结果更加接近实际。蒋立群等^[8]基于室内非均质含水层砂箱实验, 研究了水力层析法和克立金法刻画非均质含水层渗透系数场的优劣; 郝永红等^[9-10]利用数值算例系统分析了水力层析法可准确获取含水层的裂隙带分布信息; Illman 等^[11]基于两次抽水试验数据, 运用水力层析法建立了日本 Mizunami 地下实验室水文地质参数的三维分布图, 揭示了断层导水特征; 董艳辉等^[12]应用水力层析法研究了离散裂隙网络的连通性, 获取的渗透特性分布可以更好地预测渗流规律; Fischer 等^[13]通过结构约束模型推断了岩溶地区水力特性的空间分布。但目前为止, 还未有利用煤矿放水试验获取含水层水文地质参数分布信息的相关研究。

在本研究中, 运用水力层析法分析煤矿井下叠加放水试验数据, 反演计算含水层水文地质参数, 并根

据互相关分析具体解释水力层析法识别含水层参数空间分布特征的原理。该方法操作简单, 适用性广, 获取的参数详细具体, 可准确刻画含水层的非均质性, 精确定位富水异常区的位置及范围, 有效降低突水事故风险, 为煤矿放水试验数据分析及矿井水文地质条件评价提供一套新方法。

1 水力层析法原理

同步连续线性估计算法 (Simultaneous Successive Linear Estimator, 简称 SimSLE) 发展成熟, 且已得到广泛应用^[14-16]。本研究基于 SimSLE 算法, 结合煤矿井下叠加放水试验, 具体解释水力层析法的基本原理。

1.1 地下水流控制方程

地下水流控制方程用于模拟地下水流动变化, 是进行水文地质参数反演的基础。对于饱和带非均质各向同性介质中的非稳定承压水问题, 地下水流控制方程为:

$$\nabla \cdot [T(\mathbf{x}) \nabla H] + Q(\mathbf{x}_p, t) = S(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

边界条件和初始条件分别为:

$$H|_{\Gamma_1} = H_1, [K(\mathbf{x}) \nabla H] \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_2} = q \quad (2)$$

$$H|_{t=0} = H_0 \quad (3)$$

式中: H ——水头/m;

$\mathbf{x}$ ——二维空间坐标/{m, m};

$Q(\mathbf{x}_p, t)$ —— $\mathbf{x}_p$ 处 t 时刻的放水孔流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

$T(\mathbf{x})$ ——导水系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

$K(\mathbf{x})$ ——渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

$S(\mathbf{x})$ ——储水系数;

H_1 ——Dirichlet 边界 Γ_1 的水头/m;

q ——Neumann 边界 Γ_2 单位法向量 $\mathbf{n}$ 方向的流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

H_0 ——含水层初始水头/m。

1.2 同步连续线性估计算法

SimSLE 是一种基于地质统计学的参数估计方法^[17]。不同于传统放水试验分析中的均质性假设, SimSLE 将导水系数和储水系数的自然对数及观测孔水头处理成空间随机变量:

$$\ln T = f = \bar{f} + f' \quad (4)$$

$$\ln S = s = \bar{s} + s' \quad (5)$$

$$H = \bar{h} + h' \quad (6)$$

式中: $\bar{f}$ 、 $\bar{s}$ 、 $\bar{h}$ ——均值;

f' 、 s' 、 h' ——扰动值。

SimSLE 从带有权重的线性估计开始, 利用直接测量的含水层水文地质参数值和放水试验过程中的水头测量值, 计算得到参数的初始估计值。权重根据水头测量值与水文地质参数的统计属性, 如均值、相关长度、水头测量值和参数之间的互协方差和自协方差, 利用协同克里格(cokriging)方法计算得到。在估计过程中, 参数的自协方差不断更新, 代表估计不确定性的变化^[18-19]。以导水系数为例, 初始估计结果为:

$$\hat{f}^{(1)}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^{N_f} \lambda_{0i} f^*(\mathbf{x}_i) + \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_h(k)} \sum_{l=1}^{N_t(k,j)} \mu_{0kjl} [H^*(k, \mathbf{x}_j, t_l) - H_e(k, \mathbf{x}_j, t_l)] \quad (7)$$

式中: $\hat{f}^{(1)}(\mathbf{x}_0)$ —— $\mathbf{x}_0$ 处的导水系数扰动值的估计值;

H^* ——实际水头测量值;

H_e ——通过地下水流控制方程求得的水头模拟值;

N_f ——参数测量点的总数;

N_p ——放水试验的总次数;

$N_h(k)$ ——第 k 次放水试验中水头测量点的总数;

$N_t(k, j)$ ——第 k 次放水试验中第 j 个水头测量点随时间变化的水头测量数据的总数;

λ_{0i} ——协同克里格权重, 即第 i 个参数测量点的参数值 f^* 对 $\mathbf{x}_0$ 处的参数估计值的权重;

μ_{0kjl} ——实际水头测量值 $H^*(k, \mathbf{x}_j, t_l)$ 对参数估计值的权重。

第一次参数估计结果, 通过 $\exp[\bar{f} + \hat{f}^{(1)}(\mathbf{x}_0)]$ 变换代入地下水流控制方程进行下一步迭代计算。由式(1)可知, 水头测量值与含水层参数 (T 或 S) 之间为非线性关系, 协同克里格方法为线性估计算法, 故该线性估计算法需要进行多次迭代满足非线性关系, 迭代计算公式为:

$$\hat{f}^{(r+1)}(\mathbf{x}_0) = \hat{f}^{(r)}(\mathbf{x}_0) + \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_h(k)} \sum_{l=1}^{N_t(k,j)} \omega_{0kjl}^{(r)} [H^*(k, \mathbf{x}_j, t_l) - H^{(r)}(k, \mathbf{x}_j, t_l)] \quad (8)$$

其中, $\omega_{0kjl}^{(r)}$ 是第 r 次迭代时, 第 k 次放水试验中第 j 个水头测量点 $\mathbf{x}_j$ 在 t_l 时刻, 实际水头测量值 $H^*(k, \mathbf{x}_j, t_l)$ 和水头模拟值 $H^{(r)}(k, \mathbf{x}_j, t_l)$ 的差值对 $\mathbf{x}_0$ 处的参数估计值的权重。

将参数估计值代入地下水流控制方程, 计算在水头测量点不同时刻的模拟值, 判断模拟值与实际测量值之间的差异, 若差异没有达到指定精度, 上述计算过程会重复迭代进行。

1.3 互相关分析

运用水力层析法时, 不同位置的放水孔和观测孔水头响应数据反映了含水层不同区域的水文地质参数信息。通过分析随时间变化的水头测量值与导水系数和储水系数的互相关性, 可以进一步解释水力层析法识别含水层空间异质性的原理^[20]。

任意位置的水头 $H(\mathbf{x}, t)$ 在均值 $\bar{h}(\mathbf{x}, t)$ 处的一阶泰勒公式为 $H(\mathbf{x}, t) \approx \bar{h}(\mathbf{x}, t) + h'(\mathbf{x}, t)$, 扰动项的表达式为:

$$h'(\mathbf{x}, t) = \mathbf{J}_{hf}(\mathbf{x}, t) f'(\mathbf{x}, t) + \mathbf{J}_{hs}(\mathbf{x}, t) s'(\mathbf{x}, t) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{J}$ ——雅可比(Jacobian)系数。

假设导水系数和储水系数相互独立, 式(9)两边同时右乘 f' , 并求期望, 且利用矩阵形式表达:

$$\mathbf{R}_{hf} = \mathbf{J}_{hf} \mathbf{R}_{ff} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{hs} = \mathbf{J}_{hs} \mathbf{R}_{ss} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{R}_{hf}$ —— h 与 f 的互协方差矩阵;

$\mathbf{R}_{ff}$ —— f 的自协方差矩阵。含水层参数的空间变异性通过自协方差矩阵中的方差和相关长度表示;

$\mathbf{R}_{hs}$ —— h 与 s 的互协方差矩阵;

$\mathbf{R}_{ss}$ —— s 的自协方差矩阵。

式(9)两边同时右乘 h' , 并求期望, 代入式(10)、(11):

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{J}_{hf} \mathbf{R}_{ff} \mathbf{J}_{hf}^T + \mathbf{J}_{hs} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{J}_{hs}^T \quad (12)$$

式中: $\mathbf{R}_{hh}$ —— h 的自协方差矩阵。

由相关系数的定义, 代入式(10)、(11):

$$\rho_{hf}(t) = \frac{\mathbf{R}_{hf}(t)}{\sqrt{\sigma_h^2(t) \sigma_f^2}} = \frac{\mathbf{J}_{hf}(t) \mathbf{R}_{ff}}{\sqrt{\sigma_h^2(t) \sigma_f^2}} \quad (13)$$

$$\rho_{hs}(t) = \frac{\mathbf{R}_{hs}(t)}{\sqrt{\sigma_h^2(t) \sigma_s^2}} = \frac{\mathbf{J}_{hs}(t) \mathbf{R}_{ss}}{\sqrt{\sigma_h^2(t) \sigma_s^2}} \quad (14)$$

式中: ρ ——互相关系数矩阵;

σ_h^2 、 σ_f^2 、 σ_s^2 —— h 、 f 、 s 的方差, 即自协方差矩阵

R_{hh} 、 R_{ff} 、 R_{ss} 的对角线元素。

互相关系数矩阵可表征空间任意位置水文地质参数的不确定性对观测孔水头测量值的影响。互相关分析是在随机背景下进行的敏感性分析, 采用了地质统计学的概念, 通过期望和方差代入水文地质参数的先验信息 (prior information), 综合分析水文地质参数的空间异质性的影响。

互相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。互相关系数大于零, 即为正相关, 表现为当空间某一位置水文地质参数增大时, 水头测量值相应增大; 反之, 互相关系数小于零, 即为负相关, 表现为水文地质参数增大时, 水头测量值相应减小。互相关系数的绝对值越大, 相关性越强, 表明若赋予水文地质参数一个微小的扰动值, 水头测量值相应地改变较大, 说明对于该处水文地质参数的变化比较敏感, 该观测孔的水头响应数据对于反演水文地质参数效果显著。

2 研究区概况

研究区柠条塔井田位于陕西省榆林市境内。煤系地层地表露头近乎水平展布, 下伏煤层底板向西倾斜, 坡降为 $4\% \sim 10\%$ 。在以往勘探及矿井建设和到目前为止的生产过程中, 均未发现较大的断层 (落差大于 15 m) 或褶皱, 仅煤层底板有一些宽缓的波状起伏^[21-22]。

据地质填图及钻孔揭露, 柠条塔井田地层由老至新 (自下而上) 分别为: 侏罗系中统延安组 (J_2^y)、直罗组 (J_2^z), 新近系上新统保德组 (N_2^b), 第四系中更新统离石组 (Q_2^l), 第四系全新统风积层 (Q_4^{el}) 和冲积层 (Q_4^{al})。延安组为主要含煤地层; 直罗组为砂岩含水层; 保德组为相对隔水层, 结构较致密, 渗透性较弱。开采延安组 2^{-2} 煤层的 S1210 工作面涌水量接近 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 维持了三个多月, 涌水来源判断为直罗组砂岩含水层。涌水期间, 直罗组上覆和下覆地层的观测孔未发生相应的水头变化, 因此本研究将直罗组含水层概化为二维含水层。

3 放水试验与数值建模

以柠条塔煤矿水文地质勘探过程中的井下叠加放水试验为研究内容, 依据水力层析技术, 利用基于地质统计学的同步连续线性估计算法 SimSLE, 对水头数据进行定量解译, 并对侏罗系中统直罗组 (J_2^z) 的

含水层结构进行模拟计算。

3.1 井下叠加放水试验

在井田南翼较大范围内, 工作面推采前方的水文地质条件尚未完全探明, 需进一步查明是否存在富水异常区。工作面井下施工钻孔数量较多, 自切眼往外约 $2\,000\text{ m}$ 范围内工作面顶板有几十个钻孔 (图 1), 斜向上全部贯穿直罗组含水层直至保德组黏土层。利用井下钻孔进行采前大流量放水试验。第四系地面观测孔 (图 1 Q5) 测量放水试验过程中离石组含水层的水头变化, 探查工作面涌水与第四系水的水力联系, 测量数据表明放水过程中没有明显的水头变化, 故进一步确定保德组为相对隔水层, 放水试验与第四系水无水力联系。

放水试验共持续 9 d , 放水次序为自南向北, 采用叠加放水的方式。根据放水前对井下所有钻孔涌水量的排查情况, 共选取工作面顶板上 30 个水量较大

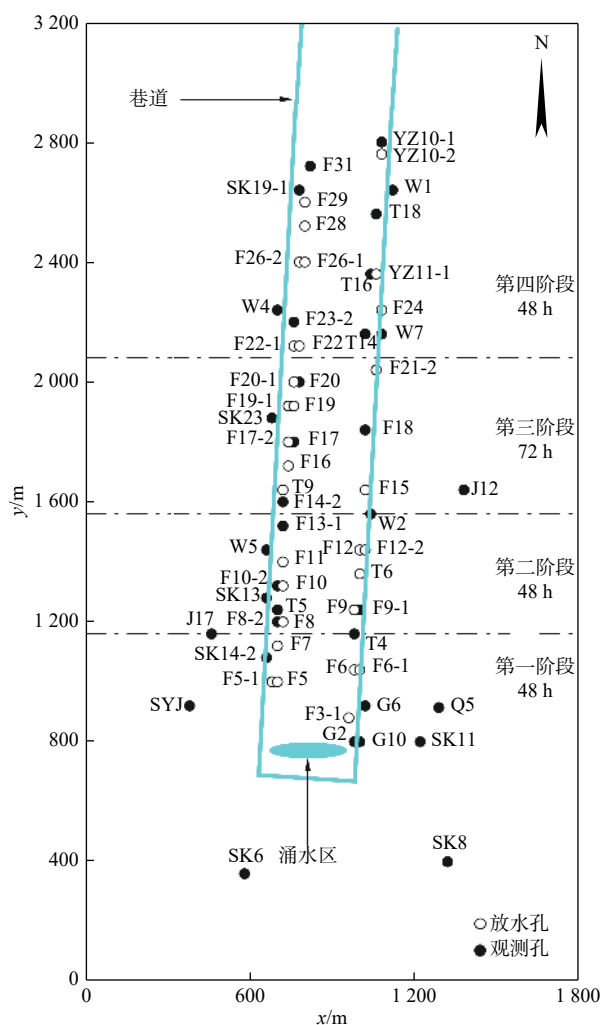


图 1 钻孔分区布置平面图

Fig. 1 Plan of the boreholes zoning scheme

的钻孔作为放水孔。分区域选取 28 个井下钻孔(其中工作面顶板钻孔 17 个,巷道外侧钻孔 11 个)和 6 个地面钻孔作为水头观测孔。

34 个观测孔全程测量水头。试验正式开始时,第一阶段开启 F3-1、F5、F5-1、F6、F6-1、F7 共 6 个放水孔阀门(图 1)。第一阶段放水持续 2 d。第二阶段开启 T6、F8、F9、F10、F11、F12、F12-2 共 7 个放水孔阀门(图 1)。此时共有 13 个钻孔联合放水。第二阶段放水持续 2 d。第三阶段开启 T9、F15、F16、F17-2、F19、F19-1、F20-1、F21-2 共 8 个放水孔阀门(图 1)。此时共有 21 个钻孔联合放水。第三阶段放水持续 3 d。第四阶段开启 YZ10-2、YZ11-1、F22、F22-1、F24、F26-1、F26-2、F28、F29 共 9 个放水孔阀门(图 1)。此时共有 30 个钻孔联合放水。第四阶段放水持续 2 d。每个阶段的稳定放水量分别为 270、214、167、96 m³/h,最后稳定放水总量为 747 m³/h。按照 1 h 时间步长,将采集到的流量数据分段累加,并保持水量不变,换算至整小时时刻处。

在放水的四个阶段分别选取一个井下观测孔,及一个地面观测孔,共 5 个观测孔表示放水试验期间的降深随时间变化的动态趋势(图 2)。位于第一阶段放水孔群附近的观测孔 SK14-2 在放水的第一阶段便有水头响应,降深随着放水的进行不断增大;位于第二阶段放水孔群附近的观测孔 F9-1,由于第一阶段放水影响的含水层范围有限,故在第一阶段该处水头响应较弱,降深较小,第二阶段初期降深迅速增大,之后稳步上升;第三阶段放水孔群附近的观测孔 F18 的水头响应降深见图 2;第四阶段放水孔群附近的观测孔 YZ10-1 的水头响应降深见图 2。在整个放水试验过程中,直罗组地面观测孔 J12、J17、SK6、SK8、SK11、

SYJ 的降深较小,均小于 1 m, J17 的降深见图 2。

3.2 模型建立

概化数值模型为 1 800 m × 3 200 m 的二维非均质饱和含水层,将含水层模型划分为 90 × 80 个单元格,每个单元格为 20 m × 40 m,四周为 1 000 m 的定水头边界,初始水头为 1 000 m。定水头边界及初始水头设置为 1 000 m 可保证含水层始终维持饱和。水力层析反演计算时需给定水文地质参数的初始场,设定 $\ln T = 1.3$, 方差为 1.0, $\ln S = -5.0$, 方差为 0.5, x 和 y 方向的相关长度均为 100 m。利用放水试验获得的每小时观测孔水头数据,迭代估计含水层水文地质参数的空间分布特征。选取的 18 个时刻的水头数据分别位于 $t = 1, 6, 20, 40, 56, 70, 80, 97, 100, 110, 130, 150, 169, 174, 185, 195, 216$ h, 保留了水头的整体趋势和关键转折点^[23-24]。水力层析法的反演算法 SimSLE 由亚利桑那大学 Yeh 教授课题组开发的软件 VSFT2 实现,下载链接为 <http://tian.hwr.arizona.edu/downloads>。

4 结果与分析

4.1 水力层析反演结果分析

水文地质参数的反演结果见图 3。图 3(a)、(b)是仅由第一阶段的观测孔水头数据反演得到的导水系数和储水系数的空间分布,一个靠近涌水位置的高 T 高 S 区初步显现;图 3(c)、(d)是由第一、二阶段的水头数据联合反演得到的参数空间分布;图 3(e)、(f)是由前三个阶段的水头数据联合反演得到的参数空间分布;图 3(g)、(h)是由完整的四个阶段的水头数据联合反演得到的参数空间分布。

随着放水孔阀门的逐阶段开启, T 和 S 的分布模式逐渐形成且轮廓清晰。工作面的南部涵盖强导水区域,且有可能延伸至模型区域之外,与大流量、长时间的涌水密切相关。在巷道内侧,强导水区域向北延伸,继而出现相对弱导水区域,并与弱储水区域对应。

实施第四阶段放水试验的目的是刻画工作面北部甚至更远区域参数的空间分布。由于放水试验影响范围有限,且钻孔集中分布于巷道附近,估计参数的空间异质性仅体现在巷道内侧有限区域内,巷道外侧大部分区域基本按照参数均值均匀分布。

图 3 中标注了 $T = 2 \text{ m}^2/\text{d}$ 、 $T = 8 \text{ m}^2/\text{d}$ 、 $S = 0.005$ 和 $S = 0.011$ 时的等值线,等值线内的区域分别对应相对低 T 区、高 T 区、低 S 区和高 S 区。由图 3 可推知,工作面南北富水性差异大,涌水区位于强导水带上;从

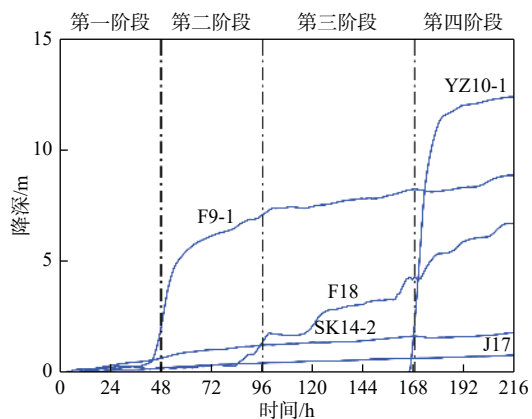


图 2 降深随时间变化的动态图

Fig. 2 Representative temporal drawdown data

涌水区往北, 导水系数和储水系数整体逐渐减小; 南部导水系数和储水系数均较大, 属于富水异常区。据文献 [25] 所述, 工作面南北富水性差异大与直罗河冲刷沉积有关, 工作面位于冲刷带的尖灭部位, 因此南北富水性差异大。

4.2 水头与水文地质参数的互相关分析

为了直观地将互相关系数的变化规律展现出来,

在放水试验的各阶段分别选取一个观测孔, 计算了观测孔在各阶段初期、中期、末期的水头与导水系数和储水系数的互相关系数。

由图 4(a)、(b)、(c) 可知, 在放水试验初期 ($t = 10$ h), 直罗组地面观测孔 SYJ 与放水孔群之间存在明显的负相关性, 该负相关区域在整个放水阶段持续存在, 但随着时间的延续, 范围逐渐缩小, 负相关性逐渐

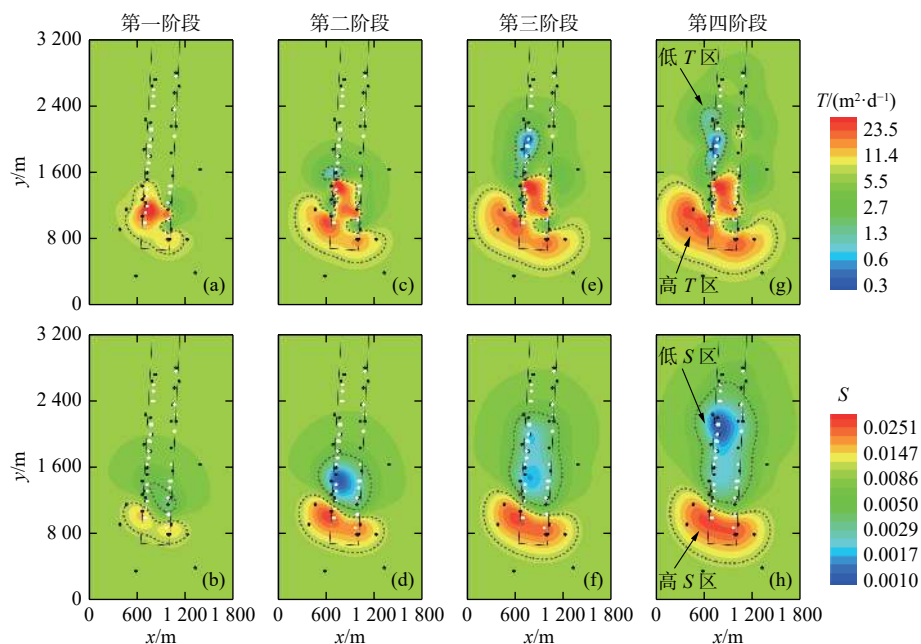


图 3 水文地质参数的反演结果

Fig. 3 Inversion results of the hydrogeological parameters

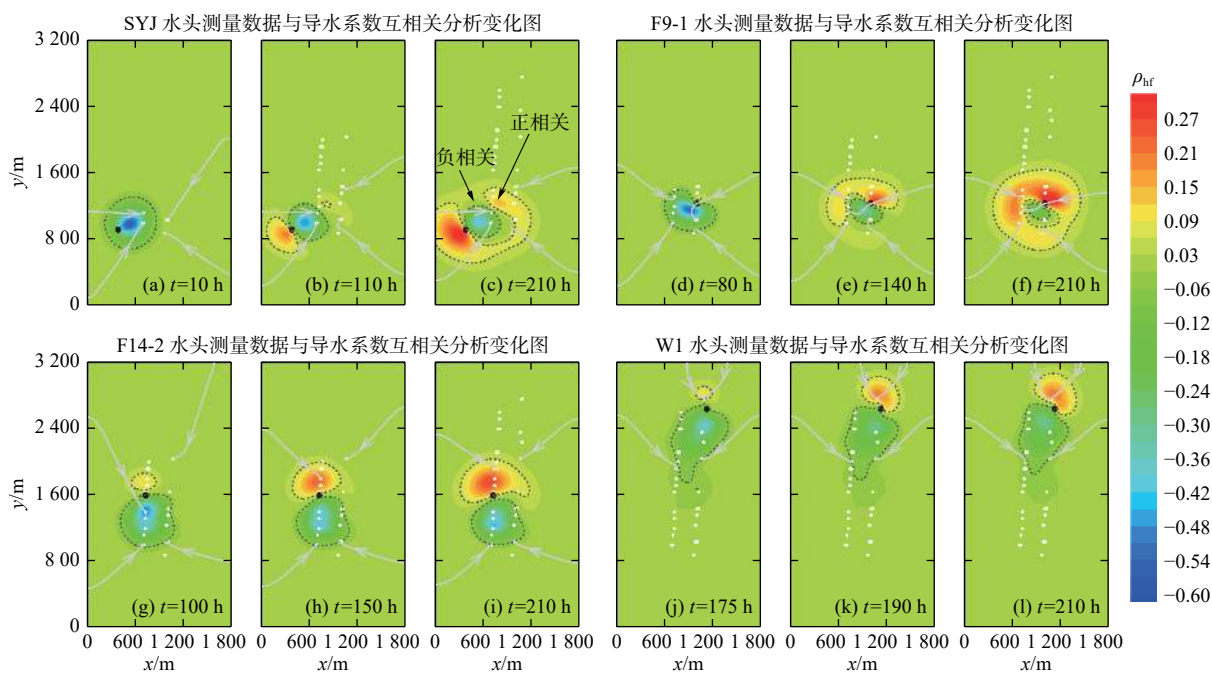


图 4 水头与导水系数的互相关系数 ρ_{hf} 时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of cross-correlation between head and transmissivity

减弱。在放水试验中期($t=110$ h),该观测孔的上游(根据图中流线所示方向判断)及放水孔群的上游存在正相关性,随着时间的延续,该区域范围逐渐扩展,最终连为一个整体,环绕在负相关区域周围,正相关性逐渐加强。

由图 4(d)、(e)、(f)可知,在放水试验的第一阶段,井下观测孔 F9-1 水头未发生明显变化,故互相关分析的初期选取 $t=80$ h。互相关系数空间分布的发展趋势与观测孔 SYJ 类似,由初期的负相关发展为末期的正相关。

由图 4(g)、(h)、(i)可知,在第三阶段放水试验初期($t=100$ h),井下观测孔 F14-2 下游及上游分别存在明显的负相关区域及正相关区域,这两个区域在第三、四阶段持续存在,但随着时间的延续,负相关区域范围逐渐缩小,并逐渐减弱;正相关区域范围逐渐扩大,且逐渐增强。互相关系数空间分布的发展趋势与从第一阶段开始的放水类似,但没有显现出放水孔群上游的正相关区域。在通常的水头与导水系数的互相关分析中,一般针对一个观测孔及一个放水孔,由于这里是放水孔群,观测孔与放水孔之间的负相关区域及放水孔上游的正相关分布区域较大,最终导致正相关区域仅出现在观测孔上游。

由图 4(j)、(k)、(l)可知,井下观测孔 W1 与观测孔 F14-2 的互相关系数空间分布的发展趋势类似。

由图 4 可知,水头与导水系数的互相关系数空间分布的发展趋势类似,在初期负相关性较强,末期正相关性较强,且相关区域范围扩大。故放水试验末期的水头数据更利于估计导水系数,且不同位置观测孔的相关区域不同,相近时间的互相关系数分布类似,因此可联合不同观测孔在不同时间的水头数据,求取含水层导水系数的高精度空间分布。

对于相同观测孔,在同一时间段的水头与储水系数的互相关系数矩阵的计算结果见图 5。水头与储水系数的互相关性规律相对简单,整个放水过程均呈正相关性,且靠近观测孔附近的相关性较强。随着时间的延续,正相关性逐渐减弱。由图 5 可知,放水试验初期的水头数据对于估计储水系数比较有效。

图 4、图 5 中的虚线为正、负相关性较强区域的轮廓线,直观表征了该观测孔的水头数据可精细刻画参数空间范围。对于同一观测孔,图中标注了对应时刻的同条流线,以判断观测孔和放水孔群各自的上、下游区域。

综合水头与导水系数和储水系数的相关性分析结果,各个阶段的相关系数分布具有相似性,正相关和负相关区域按照一定的规律变化。本研究针对每个观测孔选择的 18 个水头数据,集中分布在每个阶段的初期和末期,可以更加有效的获取研究区的水文地质参数分布信息。

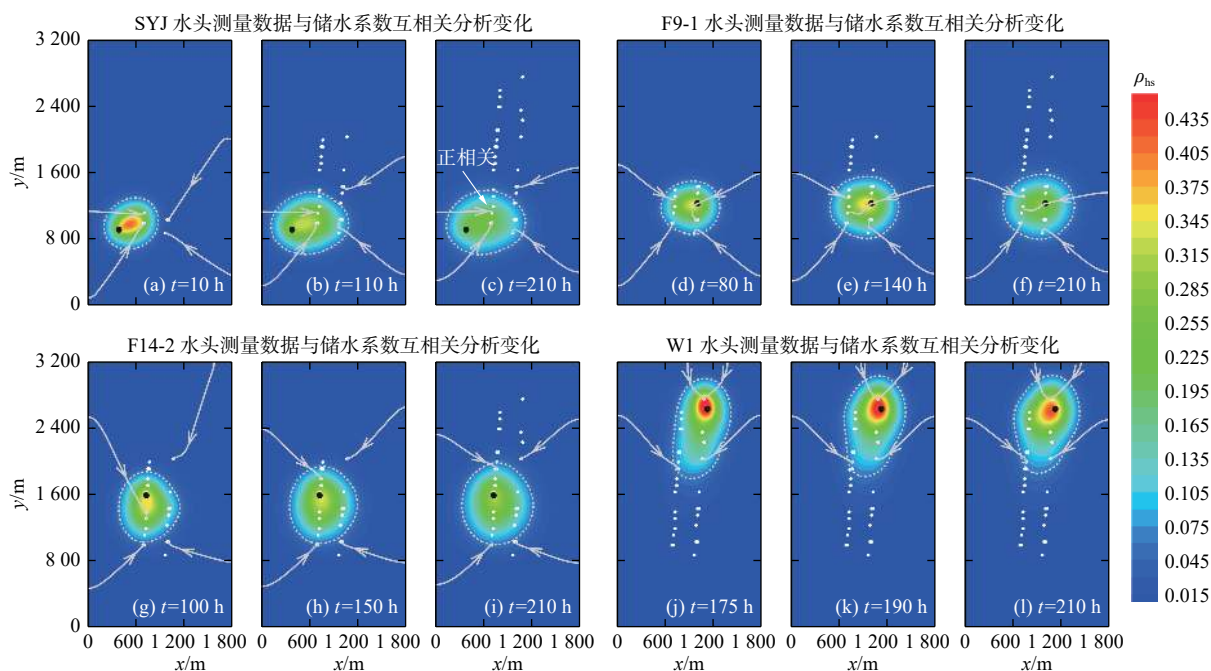


图 5 水头与储水系数的互相关系数 ρ_{hs} 时空分布

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of cross-correlation between head and storativity

5 结论

通过本研究可见,利用水力层析法分析井下叠加放水试验,是在传统放水试验分析基础上的创新,根据本次井下叠加放水试验,可以得出以下结论:

(1)水力层析法是一种有效的非均质含水层参数识别的新技术,相较于传统放水试验分析方法,它在识别含水层非均质特性方面具有优势。

(2)互相关分析结果表明每个观测孔数据与水文地质参数都存在相关性较强的区域,且初期及末期数据分别与储水系数和导水系数相关性较强,可增加观测数据,中期数据适当稀疏选取,将多个观测孔数据联合起来结合水力层析技术,可以较准确地反演出符合实际情况的参数分布信息。

(3)本研究将井下放水视为针对含水层的刺激源,联合多个观测孔的水头响应数据,反演研究区域水文地质参数的空间分布,捕捉到了研究区域的主要地质结构特征,刻画较精细。针对有突水风险的矿井,预先采用水力层析法分析矿井水文地质条件,推采时避开富水异常区,或者提前采取有针对性的防治水工程措施,可以有效降低突水事故风险。

参考文献 (References):

- [1] 李文鹏. 地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 1-4. [LI Wenpeng. Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 1-4. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 许光泉, 桂和荣, 张连福, 等. 矿井大型放水试验及其意义[J]. 地下水, 2002, 24(4): 200-201. [XU Guangquan, GUI Herong, ZHANG Lianfu, et al. Large scale water releasing tests and its application[J]. Ground Water, 2002, 24(4): 200-201. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘再斌. 基于抽水试验的侏罗纪砂岩渗透性空间特征研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(7): 82-84. [LIU Zaibin. Study on permeability space features of Jurassic sandstone based on water pumping test[J]. Coal Engineering, 2013, 45(7): 82-84. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钻孔抽水试验规程: SL 320-2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of pumping test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL 320-2005[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)]
- [5] 邵红旗, 曹祖宝, 李建文, 等. 一种放水试验分析方法及其应用[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 7-12. [SHAO Hongqi, CAO Zubao, LI Jianwen, et al. A method of analysis of dewatering test and application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 7-12. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 曹祖宝, 李建文, 王新锋. 基于矿井突水反演计算水文地质参数方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 111-114. [CAO Zubao, LI Jianwen, WANG Xinfeng. Study on method of mine water inrush for inverse calculation of hydrogeological parameters[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 111-114. (in Chinese with English abstract)]
- [7] WU C, YEH T J, ZHU J F, et al. Traditional analysis of aquifer tests: Comparing apples to oranges?[J]. Water Resources Research, 2005, 41(9): 1-12.
- [8] 蒋立群, 孙蓉琳, 王文梅, 等. 水力层析法与克立金法估算非均质含水层渗透系数场比较[J]. 地球科学, 2017, 42(2): 307-314. [JIANG Liqun, SUN Ronglin, WANG Wenmei, et al. Comparison of hydraulic tomography and kriging for estimating hydraulic conductivity of a heterogeneous aquifer[J]. Earth Science, 2017, 42(2): 307-314. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郝永红, 叶天齐, 韩宝平, 等. 运用水力层析法对含水层裂隙带成像[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 6-11. [HAO Yonghong, YE Tianqi, HAN Baoping, et al. Imaging fracture connectivity using hydraulic tomography[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 6-11. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈晓瑞, 陈小林, 赵帅军. 应用水力层析法对渗漏通道进行成像[J]. 河南科学, 2015, 33(6): 970-976. [CHEN Xiaorui, CHEN Xiaolin, ZHAO Shuaijun. Imaging leakage passage using hydraulic tomography[J]. Henan Science, 2015, 33(6): 970-976. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ILLMAN W A, LIU X Y, TAKEUCHI S, et al. Hydraulic tomography in fractured granite: Mizunami underground research site, Japan[J]. Water Resources Research, 2009, 45(1): 1-18.
- [12] DONG Y H, FU Y M, YEH T C J, et al. Equivalence of discrete fracture network and porous media models by hydraulic tomography[J]. Water Resources Research,

- 2019, 55(4): 3234 – 3247.
- [13] FISCHER P, JARDANI A, LECOQ N. Hydraulic tomography of discrete networks of conduits and fractures in a karstic aquifer by using a deterministic inversion algorithm[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 112: 83 – 94.
- [14] 董艳辉, 李国敏, 赵春虎, 等. 应用水力层析法刻画含水层非均质性[J]. *工程勘察*, 2009, 37(12): 58 – 61. [DONG Yanhui, LI Guomin, ZHAO Chunhu, et al. Characterization of aquifer heterogeneity by using hydraulic tomography[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(12): 58 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈小林, 董海洲, 裴坡. 运用稳定流水力层析法刻画含水层异质性[J]. *低温建筑技术*, 2014, 36(11): 83 – 86. [CHEN Xiaolin, DONG Haizhou, CHANG Po. Characterization of aquifer heterogeneity using steady state hydraulic tomography[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2014, 36(11): 83 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [16] MAO D Q, LIU Z B, WANG W K, et al. An application of hydraulic tomography to a deep coal mine: Combining traditional pumping tests with water inrush incidents[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 1 – 11.
- [17] YEH T C J, LIU S Y. Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2095 – 2105.
- [18] ZHU J F, YEH T C J. Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(7): 1 – 10.
- [19] XIANG J W, YEH T C J, LEE C H, et al. A simultaneous successive linear estimator and a guide for hydraulic tomography analysis[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(2): W02432.
- [20] MAO D Q, YEH T C J, WAN L, et al. Cross-correlation analysis and information content of observed heads during pumping in unconfined aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 713 – 731.
- [21] 丁杨. 柠条塔特大型矿井设计综述[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(6): 8 – 10. [DING Yang. A review on design of Ningtiaota Super-large Coal Mine[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(6): 8 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 邵红旗. 柠条塔矿S1210工作面顶板水害综合立体探测技术[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(4): 81 – 83. [SHAO Hongqi. Integrated and stereo detection technology of roof water disaster at S1210 working face in Ningtiaota coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(4): 81 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王文梅, 孙蓉琳. 水力层析法刻画非均质含水层K与S采样时间优化设计[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(3): 165 – 170. [WANG Wenmei, SUN Ronglin. Optimal design of sampling time using hydraulic tomography to characterize the heterogeneous aquifer hydraulic conductivity and storage coefficient[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(3): 165 – 170. (in Chinese with English abstract)]
- [24] SUN R, YEH T C J, MAO D, et al. A temporal sampling strategy for hydraulic tomography analysis[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(7): 3881 – 3896.
- [25] 煤炭部煤炭科学院地质勘探分院. 陕西北部侏罗纪含煤地层及聚煤特征[M]. 西安: 西北大学出版社, 1987: 167. [Geological Exploration Branch of the Academy of Coal Sciences of the Ministry of Coal. Jurassic coal-bearing strata and the characteristics of coal accumulation from northern Shaanxi[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1987: 167. (in Chinese)]

编辑: 张若琳