

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.021

基于二维 NLCG 反演的水文地质结构辨识研究

黄磊^{1,2}, 侯泽明¹, 韩莹¹, 刘志强¹, 苟青松³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120)

摘要:地下水调查是草原水资源合理开发利用的前提,而探明水文地质结构对地下水调查尤为重要。笔者充分利用大地电磁法(MT)和地面核磁共振(SNMR)各自的优点,尝试采用 MT 和 SNMR 对水文地质结构进行探测,并通过二维非线性共轭梯度(NLCG)反演解译了电性与地层两者的对应关系;实现了典型层状含水层模型和局部含水层模型正反演试验;通过实测数据反演与钻孔资料对比验证了该反演算法对低阻含水层地质体解译的有效性。试验结果对水文地质调查具有一定参考意义,也为同类数据反演提供了方法借鉴。

关键词:大地电磁法;非线性共轭梯度法;含水层结构辨识;反演

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-0249-06

Study on Aquifer Structure Identification based on 2D Magnetotelluric NLCG Inversion

HUANG Lei^{1,2}, HOU Zeming¹, HAN Xuan¹, LIU Zhiqiang¹, GOU Qingsong³

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: Groundwater survey is the premise of reasonable development and utilization of grassland water resources. Hence finding out the aquifer structure is of great importance for groundwater survey. This paper used magnetotelluric method (MT) to identify aquifer structure. The corresponding relationship between electrical properties and strata was interpreted by two-dimensional nonlinear conjugate gradient (NLCG) inversion. The forward and inversion experiments of typical layered aquifer model and local aquifer model were carried out, and the validity of the inversion algorithm for the interpretation of geologic body of low resistivity aquifer was verified. The results provide reference for groundwater survey and a method for similar data inversion.

Keywords: magnetotelluric method; nonlinear conjugate gradient method; aquifer structure identification

收稿日期:2021-03-02;修回日期:2021-05-09;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:穆华一

基金项目:国家自然科学基金项目“露天采煤驱动下白垩系煤系地层结构变异与地下水系统时空演变机理”(51969023),内蒙古自治区科技计划项目“采煤驱动下西部典型矿区地质环境治理与生态修复关键技术研究及示范”(2020GG0076)、“内蒙古饮用地下水量质安全保障支撑技术研究”(2019GG141),内蒙古自治区自然科学基金“草原型浅层地下水系统高效精准辨识方法与补排机制的源解析”(2018MS05005),内蒙古农业大学高层次人才科研启动项目(NDYB2018-60)。

作者简介:黄磊(1983-),博士,副教授,研究生导师,主要从事水文地质与环境地质领域的教学与科研工作。E-mail:lei_huang@yeah.net。

tification; inversion

在物探技术不断发展的背景下,各国学者在进行水文地质勘察时采用了多种物探手段。赵国泽等(2004)综合 AMT 和 TEM 对煤矿断层进行了富水性探测;而 Matthew 等(2005)采用了电阻率法、电磁法解译分析了含水层沉积结构;Alastair F 等(2011)对地下水流动的运动路径进行测定时,主要运用了电阻率法、地质雷达和地震法。地球物理方法在含水层结构识别中的综合应用已经成为近年来的发展趋势(麻昌英等,2015;李承泽等,2018;刘瑞平等,2019),但研究的难点和热点始终是含水层结构的精准反演解译(李学兰等,2016)。笔者通过大地电磁法(MT)识别理论含水层模型,再采用二维 NLCG 反演来解释电学性质与地层之间的对应关系,并尝试建立目标区域的地电模型来反映含水层结构,为核磁共振法获得含水层岩性、弛豫时间、含水率、渗透系数等相关水文地质参数奠定基础,从而形成一套水文地质结构综合辨识方法。其辨识成果可以有效弥补研究区水文地质资料的不足,也可为同类数据反演提供方法借鉴。

1 非线性共轭梯度反演方法

非线性共轭梯度法(Nonlinear Conjugate Gradient, NLCG)在二维大地电磁反演中得到了广泛的应用(张昆等,2011;赵维俊等,2014)。该方法过程简单,收缩速度快,内存占用小,具有高稳定性和高准确性(R. Dehghani et al., 2019),可表示为:

$$d=F(m)+e \tag{1}$$

其中, d 表示数据向量, m 表示模型向量, e 表示残差向量, F 表示正演模拟函数。

WL Rodi 等(2001)采用“正则化解”的方式得到了目标函数极小值。定义为:

$$\phi(m)=(d-F(m))^TV^{-1}(d-F(m))+\lambda m^TL^TLm \tag{2}$$

笔者选用 Polak-Ribiere 的非线性共轭梯度算法,在线性方向搜索极小化模型序列:

$$m_0=m \tag{3}$$

$$\phi(m_q+\alpha_qp_q)=\min\phi(m_q+\alpha_qp_q) \tag{4}$$

$$m_{q+1}=m_q+\alpha_qp_q,q=0,1,2,\cdots \tag{5}$$

然后,沿 p_q 计算搜索步长 α_q 来进行目标函数

迭代达到极小化,搜索方向为:

$$p_0=-C_0g_0 \tag{6}$$

$$p_q=-C_qg_q+\beta_qP_{q-1},q=1,2,\cdots \tag{7}$$

对高斯-牛顿线性搜索方法改进后为:

$$\varphi_{(a)}=\psi(m_q+\alpha p_q) \tag{8}$$

$$\widetilde{\varphi}_q(\alpha;m_{ref})=\widetilde{\psi}(m_q+\alpha p_q;m_{ref}) \tag{9}$$

则最小值为:

$$\alpha_{q,w+1}=\alpha_{q,w}-\frac{gT_{q,w}p_q}{pT_q\widetilde{H}_{q,w}p_q} \tag{10}$$

其中, $\widetilde{H}$ 是 Hessian 矩阵的近似矩阵,使得 $g_{q,w}=g(m_{q,w}),\widetilde{H}_{q,w}=\widetilde{H}(m_{q,w})$,从而得到最佳拟合模型。

2 含水层理论模型反演试验

笔者建立了 2 种不同产状的低阻含水层模型,用来验证二维 NLCG 反演算法对含水层反演是否准确有效。

图 1 是层状含水层模型。上覆 30 m 的覆盖层,电阻率为 $30\ \Omega\cdot m$;中间为厚 30 m, $10\ \Omega\cdot m$ 的低阻含水层;下部隔水层厚 140 m,电阻率为 $120\ \Omega\cdot m$ 。通过有限元进行 TE 模式正演(图 2)。由正演结果可以得出:电阻率分为 3 层,顶底两层为高阻层,中间层电阻率较低。尽管正演结果会受到低阻体积效应的影响,不同层的电阻值在分界处会渐进过渡,理论模型和实际结果在垂向分辨上存在一定误差,但可以分辨出不同阻值的分层情况,尤其对低阻含水层有一定的反应(李培熙等,2019;常威等,2019)。总体来说,正演模型可以较好地反映实际情况。

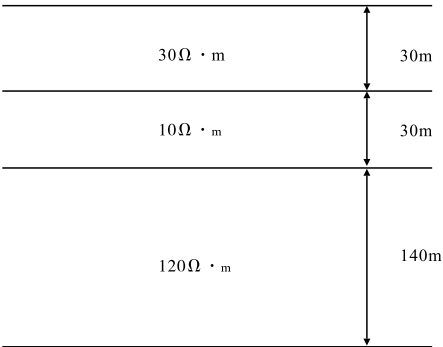


图 1 层状含水层模型图
Fig. 1 Layered aquifer model

从二维 NLCG 反演结果(图 2)可以清晰地分辨出大约 30 m 处为一、二层的分界线,但第二层底边界下延了 100 m 的深度。大体上地层模型和电性

结果的相关性较好,特别是中间含水层能够被识别,说明二维 NLCG 算法对层状低阻层反演有一定的效果。

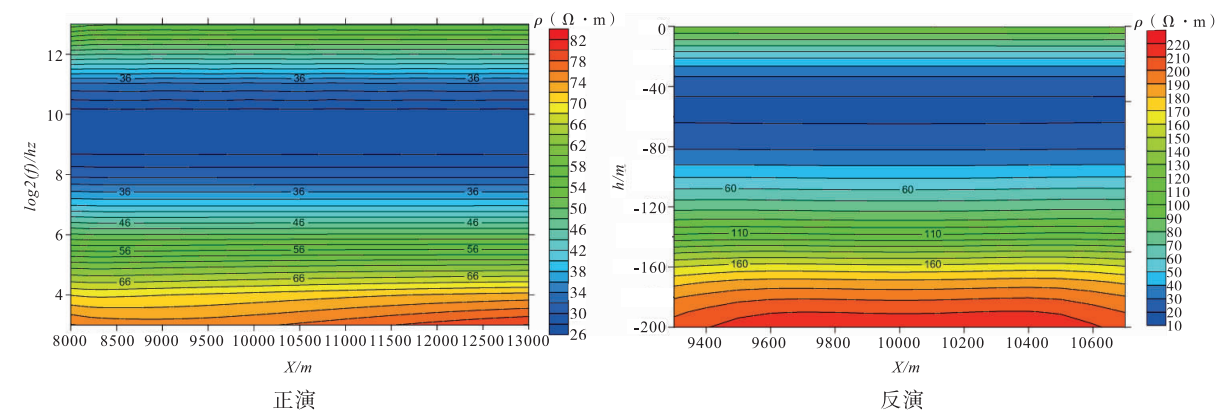


图 2 层状含水层模型正反演图

Fig. 2 Forward and inversion of layered aquifer model

图 3 是局部含水层理论模型,上覆厚 100 m、1 000 Ω·m 的高阻层。局部为埋深 200 m、长 500 m、宽 100 m 的 10 Ω·m 低阻含水层;局部含水层所处的围岩电阻率为 100 Ω·m,总深度 600 m。

3 含水层结构辨识试验

试验数据来源于内蒙古锡林河流域,数据采集选用 EH-4 电导率仪和地面核磁共振 NUMIS-POLY 系统(虎维岳等,2017;黄磊等,2018)。根据测区地质资料和电性特征,将视电阻区间划分为三级。Ⅰ级:电阻率 5~25 Ω·m,岩性为湖积砂-砾石;Ⅱ级:电阻率 25~120 Ω·m,岩性主要为粗砂-砾岩;Ⅲ级:电阻率大于 125 Ω·m,岩性常见于凝灰岩、玄武岩。笔者通过对比实测数据的解译结果与钻孔资料,以验证二维 NLCG 反演解译的准确性。

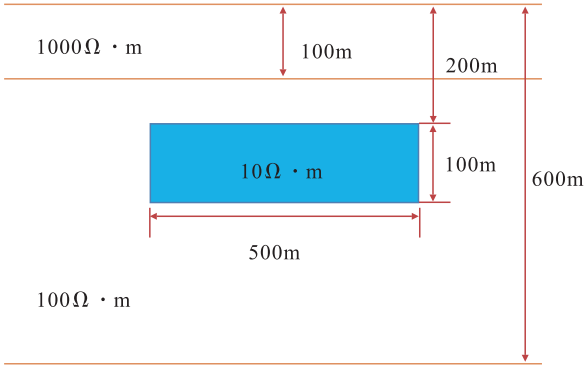


图 3 局部含水层模型图

Fig. 3 Local aquifer model

图 4 为通过 TE 模式进行正演后得到局部含水层模型。图 4 中表层为高阻,中间夹低阻含水层,其体积效应的影响导致电阻值向四周不断升高。对正演模型进行二维 NLCG 反演解译,其反演结果见图 4。高阻体下边界反映清晰,以 200 Ω·m 等值线为分界线。边界以下是低电阻围岩,其电性特征与理论模型对应良好。埋深在 200~300 m 的中心位置为低电阻层,其边界向外延扩。由上述分析可知二维 NLCG 反演对局部低阻体有较好的识别效果。

图 5 为电阻率剖面图,该测线均匀布设 9 个测点,剖面深度约为 180 m。浅表层为高阻层,厚度不大,产状平缓,推断其为凝灰岩薄层。30 m 以下为低阻层,推断岩性为砂土,并赋存孔隙水,该层可能是富水性较好的含水层。

在大地电磁二维 NLCG 反演基础上,对剖面中点进行核磁共振探测,其测试结果见图 6,解译数据见表 1。分析得出:5 m 处为表层土壤水。18 m 以下为较厚含水层,解译推测含水率为 1.20%~5.53%,渗透系数为 $1.51 \times 10^{-7} \sim 4.93 \times 10^{-5}$ m/s,岩性为砂砾石层,核磁测深未见隔水底板。

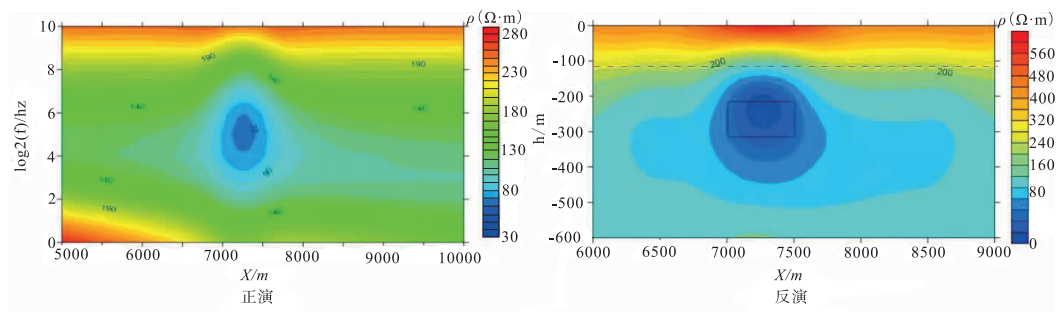


图 4 局部含水层模型正反演图

Fig. 4 Forward and inversion of local aquifer model

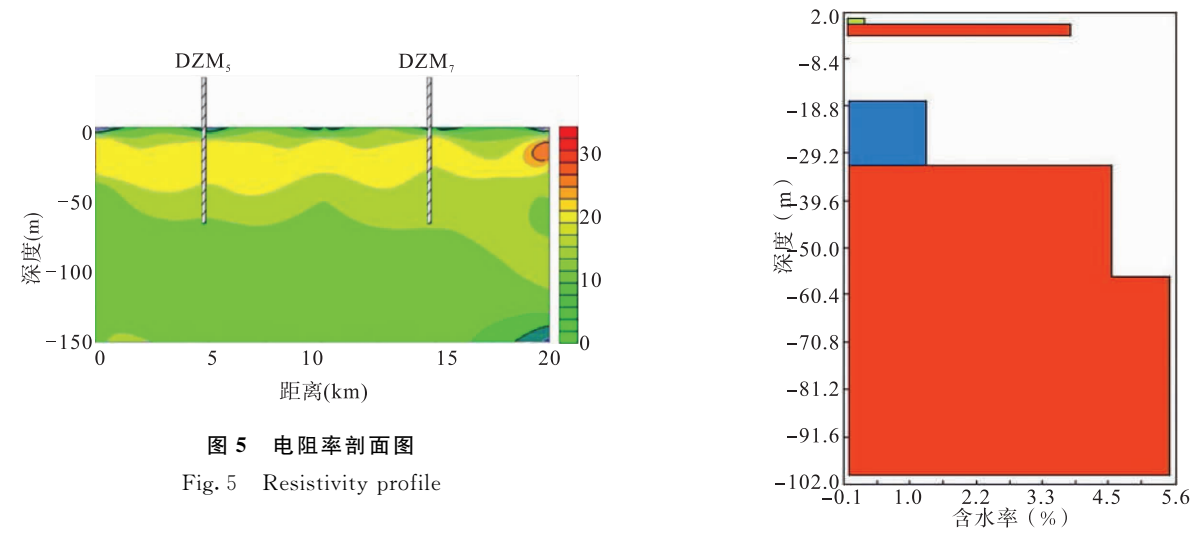


图 5 电阻率剖面图

Fig. 5 Resistivity profile

图 6 SNMR 解译结果图

Fig. 6 Interpretation result graph of SNMR

表 1 SNMR 解译数据表
Tab. 1 Interpretation data sheet for SNMR

层底深度(m)	含水率(%)	T1 * (ms)	渗透系数(m/s)	岩性
1.0	0.25	289	1.46e-06	粗砂
2.2	3.81	50	1.22e-07	细砂
3.3	3.70	40	1.35e-07	细砂
4.7	0	0	0	凝灰岩
6.8	0	0	0	凝灰岩
10.0	0	0	0	凝灰岩
14.8	0	0	0	凝灰岩
21.7	1.20	720	4.00e-05	砾石
31.9	1.36	722	4.94e-05	砾石
46.8	4.55	50	7.98e-07	细砂
68.8	5.53	117	1.50e-07	粗砂
100.0	5.53	117	1.50e-07	粗砂

通过对实测数据资料的综合分析,将垂直剖面进行了分层(图 7)。垂直方向的电阻率在浅层显示出较大的变化趋势,而在深层显示出较小的变化趋势。从凝灰岩高阻层到中粗砂低阻层电阻

率变化明显。根据钻孔资料,含水层主要为厚层松散湖积砂砾石与裂隙发育的砾岩组成,反演的视电阻率较低。泥岩和黏性土为隔水层,电阻率较高。

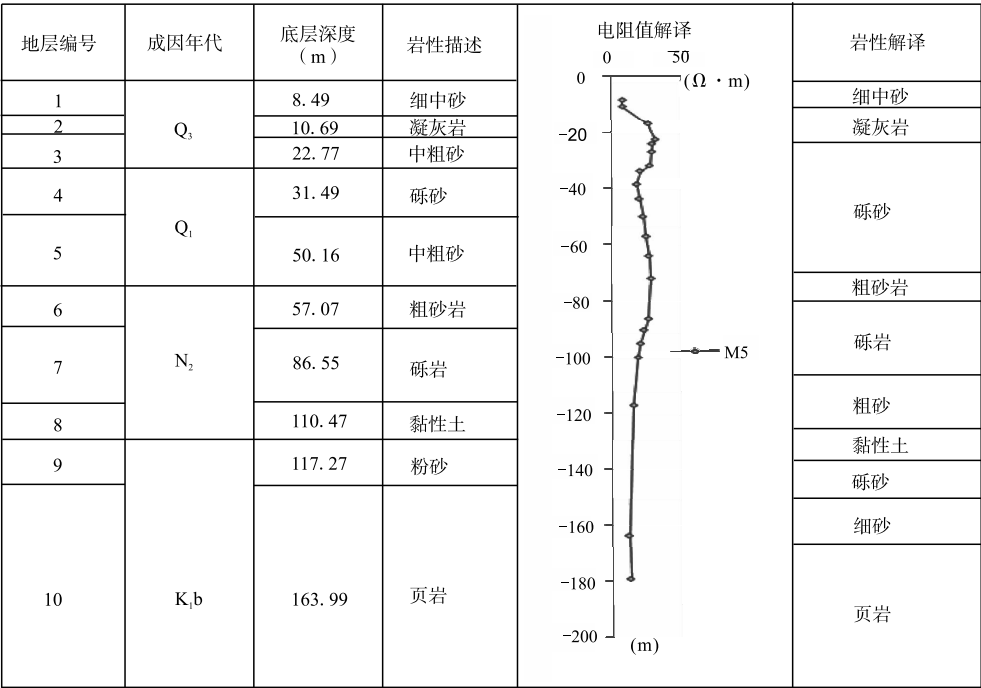


图 7 钻孔资料与反演解释结果对比图

Fig. 7 Comparison chart of borehole data and inversion interpretation results

4 结论

(1)笔者设计了 2 种常见的含水层模型,并基于非线性共轭梯度法实现了大地电磁二维 NLCG 反演。通过模型试验和实测分析验证了二维 NLCG 反演算法适用于低阻含水层地质体的电磁探测解释。借此使得含水层地电结构的精准辨识工作可以顺利开展,同时为水文物探数据解释提供了理论依据和方法借鉴。

(2)基于二维 NLCG 反演理论,解译了实测数据,得出测区电阻率与岩性特征能较好的对应,并且钻孔资料也佐证了含水介质的岩性与赋存规律。通过 SNMR 反演解译与钻孔对比,发现含水层在深度上发生了一定程度的错位,产生这种情况可能是由于测区高压线的电磁干扰所致,而将大地电磁法和核磁共振相互参照解译可以有效对含水层的地质结构进行辨识。

参考文献(References):

赵国泽,詹艳,陈小斌,等. 电磁法在地下水探查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2004(03):220-225.

ZHAO Guoze,ZHAN Yan,CHEN Xiaobin, et al. Detection on the ground water using em methods[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2004(03):220-225.

李承泽,王金荣. 地球深部水循环的动力学机制与相关问题研究进展[J]. 西北地质,2018,51(2):209-219.

LI Chengze,WANG Jinrong. Dynamics Mechanism of Deep-Earth Water Cycling and Its Research Progress[J]. Northwestern Geology,2018,51(2):209-219.

刘瑞平,徐友宁,亢文婷. 基于 phreeqci 和 netpath 联合反演水文地球化学过程——以小秦岭太峪水库为例[J]. 西北地质,2019,52(1):239-243.

LIU Ruiping,XU Youning,KANG Wenting. Based on Phreeqci and Netpath Joint Inversion Hydrology Geochemistry Process: Example from the Xiaoqinling

- Tianyu Reservoir[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(1):239-243.
- 麻昌英,柳建新,孙娅,等. 高频大地电磁测深法与双频激电法在水文地质调查中的应用[J]. *物探与化探*, 2015, 39(05):944-947.
- MA Changying, LIU Jianxin, SUN Ya, et al. The application of high frequency MT sounding method and dual frequency IP method to hydrogeological survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(5): 944-947.
- 李学兰,董艳辉,李帝铨. 基于地下水数值模拟的地球物理反演解释优化方法研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(06):1333-1343.
- LI Xuelan, DONG Yanhui, LI Diqian. An optimization method for interpreting ert data based on groundwater numerical modeling[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(06):1333-1343.
- 赵维俊,颜廷杰,高智超. 大地电磁非线性共轭梯度反演试验——以内蒙古扎鲁特盆地数据为例[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(05):2128-2135.
- ZHAO Weijun, YAN Tingjie, GAO Zhichao. Magnetotelluric nonlinear conjugate gradient inversion experiments; an example from data acquired in the Jarud Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(05):2128-2135.
- 张昆,魏文博,吕庆田,等. 井地大地电磁非线性共轭梯度二维反演研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(05):915-924.
- ZHANG Kun, WEI Wenbo, LÜ Qingtian. The study of 2-D nonlinear conjugate gradients iInversion of borehole-to-surface magnetotelluric [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(05):915-924.
- 李培熙,杨桂莲,李伟,等. 基于含水层非均质性随机特征的地下水脆弱性评价[J]. *水文*, 2019, 39(01):56-59+6.
- LI Peixi, YANG Guilian, LI Wei, et al. Groundwater vulnerability assessment based on random characteristics of aquifer heterogeneity[J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(01):56-59+6.
- 常威,黄琨,胡成,等. 云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(05):9-15+23.
- CHANG Wei, HUANG Kun, HU Cheng, et al. Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yuning Basin[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(05): 9-15+23.
- 虎维岳,赵春虎. 蒙陕矿区地下水环境系统及采掘扰动[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(2):85-89.
- HU Weiyue, ZHAO Chunhu. Groundwater environment system and mining disturbance in coal mining area of Shaanxi-Inner Mongolia[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(2):85-89.
- 黄磊. 内蒙古锡林河子流域浅层水文地质结构辨识及采煤疏干影响研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- HUANG Lei. Study on Identification of Shallow Hydrogeological Structure and Influence of Coal Mining and Drainage in Xilin River Sub-basin of Inner Mongolia [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- 黄磊,高瑞忠,李喜安,等. 基于 AHP 法与 SNMR 信息融合的含水层富水性评价方法[J]. *水文*, 2018, 38(01):35-40.
- HUANG Lei, GAO Ruizhong, LI Xi'an, et al. Aquifer Water-richness Evaluation Method Based on AHP Method and SNMR Information Fusion [J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(01):35-40.
- Matthew Kilner, L. JARED West, TAVIMurray. Characterisation of glacial sediments using geophysical methods for groundwater source protection[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2005(4):13-25.
- Alastairf. McClymont, James W. Roy, Masaki Hayashi, et al. Investigating groundwater flow paths within proglacial moraine using multiple geophysical methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2011(1):48-60.
- R. Dehghani, N. Mahdavi-Amiri. Scaled nonlinear conjugate gradient methods for nonlinear least squares problems [J]. *Numerical Algorithms*, 2019, 82(1):1-20.
- WL Rodi, RL Mackie. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 2001, 66(1):174-187.