



## 地面核磁共振技术在隐伏火烧区富水性探测中的应用

侯恩科, 樊江伟, 高利军, 王建文, 陈德海, 迟宝锁, 王宏科

引用本文:

侯恩科, 樊江伟, 高利军, 等. 地面核磁共振技术在隐伏火烧区富水性探测中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 230–237.

HOU Enke, FAN Jiangwei, GAO Lijun, et al. Application of surface nuclear magnetic resonance technology in detecting water abundance in concealed burnt zone[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 230–237.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.025>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 侏罗系宝塔山砂岩水文地质特征与解危开采研究——以新上海一号煤矿为例

Hydrogeological characteristics and danger-solving mining of Jurassic Baotashan sandstone—A case study in New Shanghai No.1 coal mine

*煤田地质与勘探*. 2020, 48(6): 170–178 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.023>

### 深埋侏罗系煤层顶板水探放技术实践——以呼吉尔特矿区葫芦素矿井为例

Practice of exploration and discharge technology of roof water in deep Jurassic coal seam: with Hu Lusu coal mine in Hujiert mine area as example

*煤田地质与勘探*. 2016, 44(6): 96–100 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2016.06.018>

### 基于ArcGIS的洛河组含水层富水性评价

Analysis of water abundance characteristics of sandstone aquifer in Luohe Formation on the basis of ArcGIS

*煤田地质与勘探*. 2019, 47(2): 151–156 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.023>

### TEM技术在岩层富水性探测中的应用

Application of TEM technique in detecting the water enrichment of strata

*煤田地质与勘探*. 2015(6): 109–113 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2015.06.023>

### 基于脆弱性指数法的韩城矿区11号煤层底板突水危险性评价

Risk assessment of water inrush of No.11 coal seam floor in Hancheng mining area on the basis of vulnerability index method

*煤田地质与勘探*. 2017, 45(4): 112–117, 125 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.020>



移动阅读

侯恩科, 樊江伟, 高利军, 等. 地面核磁共振技术在隐伏火烧区富水性探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 230–237. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.025

HOU Enke, FAN Jiangwei, GAO Lijun, et al. Application of surface nuclear magnetic resonance technology in detecting water abundance in concealed burnt zone[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 230–237. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.025

## 地面核磁共振技术在隐伏火烧区富水性探测中的应用

侯恩科<sup>1</sup>, 樊江伟<sup>1</sup>, 高利军<sup>2</sup>, 王建文<sup>2</sup>, 陈德海<sup>3</sup>, 迟宝锁<sup>4</sup>, 王宏科<sup>4</sup>

- (1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司, 陕西 榆林 719300; 3. 上海申丰地质新技术应用研究所有限公司, 上海 201702; 4. 陕西陕煤陕北矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 煤层隐伏火烧区上覆基岩复合含水层(包括风化基岩和烧变岩含水层)是煤层开采的主要威胁之一, 明确隐伏火烧区的富水性对矿井水害防治具有重要意义。基于此, 以发生过较大突水事故的柠条塔煤矿为研究对象, 利用地面核磁共振(SNMR)技术开展隐伏火烧区含水层富水性探测并对其进行分析和验证。结果表明, 隐伏火烧区共有 2 个含水层位, 分别为第四系松散砂层含水层和 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层; 第四系砂层含水层富水性受地表地形及其下隔水层顶部起伏形态影响水平变化较大; 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层富水性总体西南较低、北东较高, 该含水层厚度 9~30 m, 局部相对较厚, 推测为 1<sup>-2</sup> 煤火烧区风化基岩和烧变岩含水层的叠加反映; 研究区内 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层总体呈现出西部及中部偏东南区域富水性相对较大, 其余区域富水性相对较小。利用 SNMR 得到的含水层富水程度与探放水孔及水文孔的涌水量结果大致相同, 表明该方法的勘探结果相对可靠, 可用于隐伏火烧区富水性的探测。

**关键词:** 地面核磁共振; 隐伏火烧区; 含水层; 富水性

**中图分类号:** P641.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2021)05-0230-08 **语音讲解**



### Application of surface nuclear magnetic resonance technology in detecting water abundance in concealed burnt zone

HOU Enke<sup>1</sup>, FAN Jiangwei<sup>1</sup>, GAO Lijun<sup>2</sup>, WANG Jianwen<sup>2</sup>, CHEN Dehai<sup>3</sup>, CHI Baosuo<sup>4</sup>, WANG Hongke<sup>4</sup>

- (1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shenmu Ningtiaota Coal Mining Company Ltd., Shaanxi Coal and Chemical Industry Company Ltd., Yulin 719300, China; 3. Shenfeng Institute of Geological New Technique Application of Shanghai, Shanghai 201702, China; 4. Northern Shaanxi Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** The overlying bedrock composite aquifer(including weathered bedrock and burnt rock aquifer) in the concealed burnt zone of coal seams is one of the main threats to coal mining. It is of great significance to clarify the water enrichment of the concealed burnt zone for the prevention and control of coal mine water hazards. Ningtiaota Coal Mine, which has experienced a large water inrush accident, was used as the research object, and the Surface Nuclear Magnetic Resonance(SNMR) was used to detect the water enrichment of the aquifer in the concealed burnt area. The results show that there are two aquifers in the concealed burnt zone, namely Quaternary loose sand aquifer and 1<sup>-2</sup> coal overlying bedrock aquifer. The water enrichment of the Quaternary sand aquifer is affected by the topography of the surface and the top undulating shape of the lower aquifer, and the level changes greatly. The water content of the bedrock aquifer overlying 1<sup>-2</sup> coal is generally lower in the southwest and higher in the northeast. The thickness of the aquifer is 9-30 m, relatively thicker parts, which is presumed to be the superimposed reflection of weathered bedrock and burnt rock aquifer in the burnt area. In the study area, the overlying bedrock aquifer of 1<sup>-2</sup> coal generally shows relatively larger water quantity in the western and central southeast regions and relatively

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472234); 陕西煤业化工集团科研计划项目(2017SMHKJ-C-23)

第一作者: 侯恩科, 1963 年生, 男, 陕西扶风人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事煤田地质与矿井地质、矿井水害防治方面的教学与科研工作. E-mail: houek@xust.edu.cn

weaker water abundance. The conclusions obtained by using SNMR are roughly the same as the results of water inflows from water detection holes and hydrological holes, which indicates that the exploration results of this method are relatively reliable and can be used for the detection of water enrichment in hidden burnt areas.

**Keywords:** surface nuclear magnetic resonance; concealed burnt zone; aquifer; water enrichment

烧变岩是煤层自燃烘烤使围岩发生颜色、成分、结构和构造变化而形成的特殊岩类。陕北侏罗纪煤田煤层在地史期间曾发生过大规模的自燃, 形成了大量地表出露和埋于地下的烧变岩<sup>[1-2]</sup>。烧变岩裂隙、孔洞发育, 为地下水径流、储存提供了良好空间, 有利于接受上覆和侧方含水层补给, 或于烧变岩底部盆形构造区富集地下水, 常与松散层、风化基岩含水层一起成为矿区的复合含水层<sup>[3-4]</sup>。由于烧变岩压覆了大量优质煤炭资源, 在其下方、侧方采煤时会导致烧变岩水涌入矿井, 使烧变岩水资源遭到破坏, 同时给煤矿安全生产造成严重威胁<sup>[5-6]</sup>。所以查明隐伏火烧区的富水性具有重要意义。

目前关于火烧区相关的探测研究中, 相关学者通过地质调查、物探调查等方法从众多方面研究了烧变岩的成因机理<sup>[7]</sup>、岩石分类与特征<sup>[8]</sup>、边界范围探查<sup>[9-11]</sup>、水文地质条件及保水采煤技术<sup>[12-14]</sup>。这些研究中针对火烧区富水性探测的相关研究相对较少, 而核磁共振技术是一种唯一直接探寻地下水的地球物理勘探方法, 较比其他方法通过测试电阻率、电导率、极化率、衰减时等间接参数找水有着明显的优势。目前尚未有基于核磁共振技术对隐伏火烧区富水性探测的相关研究, 笔者通过核磁共振技术对柠条塔煤矿  $1^{-2}$  煤层隐伏火烧区内含水层富水性进行探测分析, 为隐伏火烧区富水性的探测提供了一种新方法。

## 1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地神府矿区南部、柠条塔井田南翼。柠条塔井田南翼大部分地表被现代风积沙及萨拉乌苏组沙层所覆盖, 局部地表出露第四系黄土及新近系红土; 北翼地表大部出露第四系黄土及新近系红土, 基岩零星出露。根据钻孔揭露及地质填图资料, 柠条塔井田地层由老至新依次发育为: 侏罗系富县组( $J_2f$ )、延安组( $J_2y$ )、直罗组( $J_2z$ )及安定组( $J_2a$ ), 新近系保德组红土层( $N_2b$ ), 第四系中更新统离石组黄土层( $Q_2l$ ), 上更新统马兰组黄土层( $Q_3m$ )与萨拉乌苏组( $Q_3s$ ), 以及顶部的第四系全新统风积沙层( $Q_4^{col}$ )与冲积层( $Q_4^{al}$ )。其中延安组为唯一含煤地层。

柠条塔煤矿南翼东南部发育有  $1^{-2}$  煤层隐伏火烧区, 面积约  $1.58 \text{ km}^2$ , 其西侧 S1210 工作面 2011 年

采动突水, 也表明存在  $1^{-2}$  煤层烧变岩水补给。 $1^{-2}$  煤层烧变岩含水层抽水钻孔单位涌水量  $0.038 0 \sim 0.179 9 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ , 为弱—中等富水性, 且烧变岩和风化基岩含水层水力联系较密切, 形成了复合含水层。该隐伏火烧区地表相对平坦, 为风沙滩地地貌。地下  $2^{-2}$  煤层平均厚度  $6.08 \text{ m}$ , 与  $1^{-2}$  煤层烧变岩、风化基岩平均距离分别为  $18$ 、 $22 \text{ m}$ , 综采垮落带必然导通  $1^{-2}$  煤层烧变岩含水层, 使  $2^{-2}$  煤的开采面临  $1^{-2}$  煤层烧变岩水和风化基岩水双重含水层水害威胁。为了查明隐伏火烧区含水层富水性强弱及其空间变化, 笔者采用地面核磁共振(Surface Nuclear Magnetic Resonance, SNMR)技术对研究火烧区进行了探查, 对含水层参数进行了解译分析。

本次研究区的电性变化规律为: 浅表层局部有全新统风积沙集聚区呈高阻电性特征, 下部土层呈低阻电性特征。向下至延安组砂岩地层, 上部岩层风化破碎后, 裂隙发育, 含水率增大, 泥质含量增高, 电阻率幅值随之降低, 风化程度愈高, 电阻率幅值愈低; 含煤地层电性呈增大的趋势特征, 砂岩地层中的煤层一般呈稳定的高阻特征; 至含煤地层下部稳定砂岩地层, 电阻率值较含煤地层降低。

综上, 当地层沉积层序稳定, 不含局部地质构造、烧变岩区、含水区时, 地层电性呈稳定的“高—低—高—低”趋势特征; 当地表无风积沙时, 或会呈“低—高—低”的趋势特征; 相反, 当地层中存在这些特殊地质体和含水区时, 地层电性将会发生明显的变化, 如采集的视电阻率等值线发生扭曲变形、圈闭等。这种明显的地层和局部地质体的电性差异, 为以导电性差异为应用前提的地面电法勘探的实施提供了良好的地球物理基础; 核磁共振的测量过程对电磁噪声非常敏感, 易受高压线、通信线路影响, 由于研究区位于毛乌素沙漠东南缘, 地表被现代风积沙层所覆盖, 人烟稀少、高压线路及通信线路较少, 故该区域对 SNMR 探测影响较小。

本次物探中, 地下水的存在为地面核磁共振找水勘探提供了地球物理条件。

## 2 地面核磁共振技术原理

地面核磁共振技术是电磁勘探方法领域中一种全新的探测技术<sup>[15-16]</sup>。相较于传统地球物理勘探方法, 该方法具有许多其他方法所不具备的优势, 如:

信息丰富、灵敏方便、经济便利、定量反演、解释直接等。地面核磁共振法在一定的探测深度范围内,实现了对地下水资源和含有液态氢质子的探测,到目前为止,SNMR 是唯一的一种直接探寻地下水的地球物理勘探方法。

SNMR 找水是利用不同物质原子核弛豫性质差异产生的 NMR 效应<sup>[17-20]</sup>,即利用氢核(质子)的弛豫特性差异,在地面上利用核磁感应系统,观测、研究在地层中氢核产生的核磁共振信号的变化规律,进而探查地下水(氢核-质子)是否存在(图 1)。地面核磁共振法找水仪器是使用核磁感应系统(NUMIS<sup>Poly</sup>),使仪器的探测深度达到了 150 m。在实际工作中,通过由小到大地改变激发脉冲矩,达到探测地层由浅到深的氢核的存在性和赋存状态,实现对地下水资源的探测。

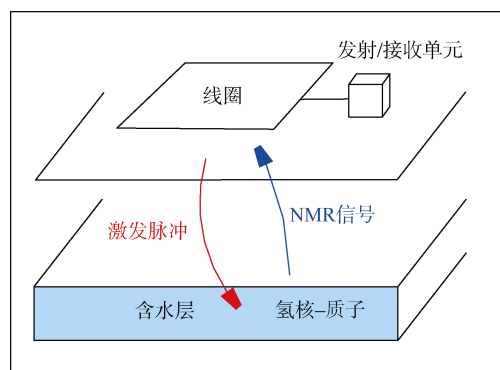


图 1 核磁共振测深方法原理

Fig.1 Schematic diagram of SNMR method

在 SNMR 方法中,通常向铺在地面上的线圈中供入频率为拉莫尔频率的交变电流脉冲,发射电流脉冲的包络线为矩形。在地层中交变电流形成的交变磁场激发下,使地下氢核形成宏观磁矩。这一宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动,其旋进频率为氢核所特有。在切断激发电流脉冲后,用同一线圈拾取由不同激发脉冲矩激发产生的 NMR 信号,该信号的包络线呈指数规律衰减。NMR 信号强弱或衰减快慢直接与质子的数量有关,即 NMR 信号的幅值与所探测空间内氢核含量成正比,因此,构成了一种直接探测氢核的方法。SNMR 找水方法的测量参数中,信号的初始振幅与地下含水层的含水量成正比;信号衰减时间与渗透性有关;信号的初始相位与含水层的导电性有关,可以用于寻找、区分淡水和盐水。

对采集的数据使用法国 IRIS 公司随仪器提供的一维反演程序进行处理、反演计算,在 SNMR 方法资料反演解释中,利用目前比较广泛使用的吉洪

诺夫正则化法。对于一组实测的 NMR 信号数据自动确定了一个解。

通过反演计算,即可获得各测点含水层的赋存部位(深度、厚度)、含水率和渗透系数等信息<sup>[21-22]</sup>,然后根据一维反演计算结果利用 Surfer 软件对各测线成果数据进行插值并绘制含水率和渗透系数断面等值线图,由所测各点反演计算的  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层含水率、渗透系数分别编绘勘查区平面等值线图。

### 3 核磁共振测点布置及质量评价

#### 3.1 核磁共振测点布置

根据勘查区内待探目的层的深度和含水量以及勘查区电磁干扰的水平、方向,优化线圈形状和科学敷设线圈。NUMIS<sup>Poly</sup> 系统配置有 600 m 长的电缆,本次工作敷设的线圈型号是大方型,边长 150 m。SNMR 工作测线共计 5 条,沿各测线每 150 m 布置一个测点,5 条测线共完成 SNMR 测点 60 个。对 SNMR 异常测点段进行加密测量,完成加密测点 17 个,合计 SNMR 物理测点 77 个(图 2)。

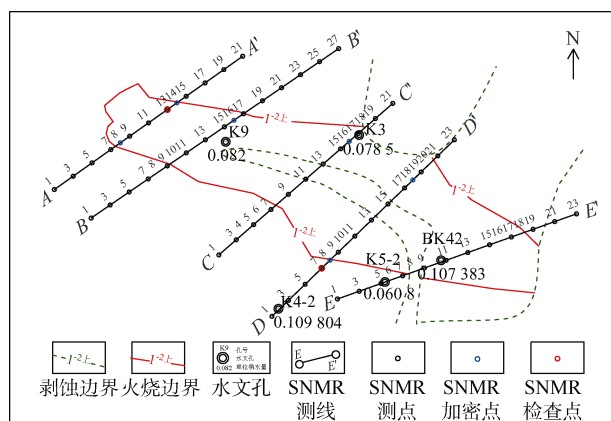


图 2 SNMR 工作测线布置

Fig.2 SNMR working line layout

#### 3.2 测点质量评价

此次野外数据采集过程中开展了质量检查工作,完成质量检查点 2 个,分别为 AA' 测线 A13 点、DD' 测线 D7 号点。

图 3 为 A13 检查点 2 次测量的一维反演结果。对比两图,可以看出在地下浅部存在一个含水量较大的含水层,含水层深度为 1~15 m。而当深度增大后,深度为 15~101 m 的位置,2 次测量结果显示的含水量均较小(接近零)。证明该深度范围内的地层不存在含水体。在地层深度为 101 m 以下位置,2 次测量结果都反映了存在含水层,在深度为

101~127 m 的位置,含水量较大,图 3a 显示的是含水量约为 5.1%,而图 3b 显示的含水量约为 4.8%。从反演的渗透系数来看,2 次测量结果的反演图基本上一致,而且变化规律也一致。总体上来看,2 次的测量结果都证明了地下深度 101~127 m 的深度范围内存在含水层,含水量约为 5%。原始观测反演结果和检查观测反演结果相对误差为 6.1%,满足规范要求的不大于 15% 的规定。证明 A13 质量检查点符合要求。

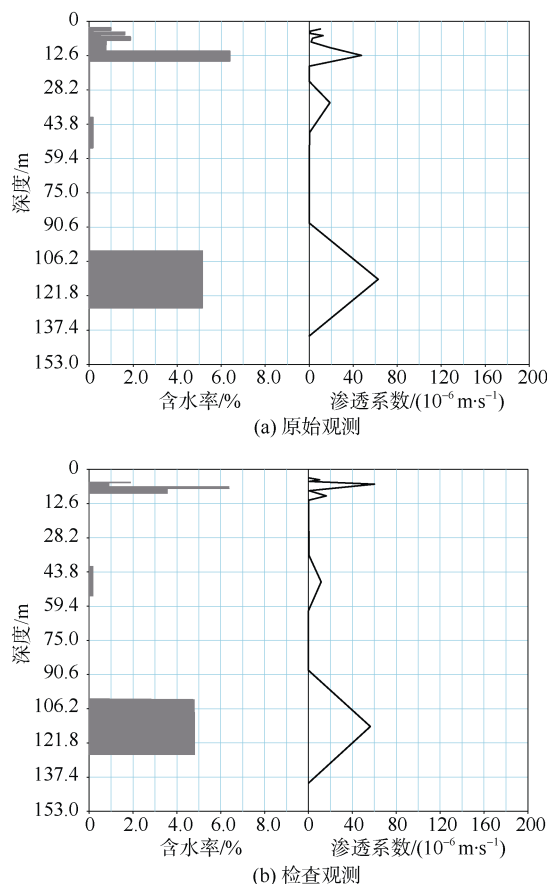


图3 A13 质量检查点一维反演

Fig.3 A13 quality check point one-dimensional inversion

图 4 为 DD' 测线 D7 号检查点两次测量的一维反演结果。可以明显地看出在地下 3~12 m 的位置存在一个含水量较大的水层,含水量为 2%~7%,而在深度为 12~71 m 的位置,2 次测量结果都反映出在该地层区间,地层中含水量为 0,即在该深度的地层中,不存在含水层。在地层深度为 71~88 m 的位置,2 次测量结果都反映存在含水率约为 0.2% 的弱含水层。在地层深度为 88~109 m 的位置,2 次测量结果都反映存在含水率大于 3% 的含水层。在地层深度为 109~135 m 的位置,原始观测反演结果显示有含水率约为 0.16% 的弱含水层,而检查观测反演结

果无弱含水层显示,推测为原始观测时可能有偶然电磁干扰影响。从反演的渗透系数来看,2 次测量结果的反演图基本上一致,且变化规律也相似。总体上来看,2 次的测量结果都证明地下深度 88~109 m 的深度范围内存在含水层,含水量为 3.1%~3.7%。原始观测反演结果和检查观测反演结果相对误差为 9.1%,满足规范要求的不大于 15% 的规定。证明 D7 质量检查点符合要求。

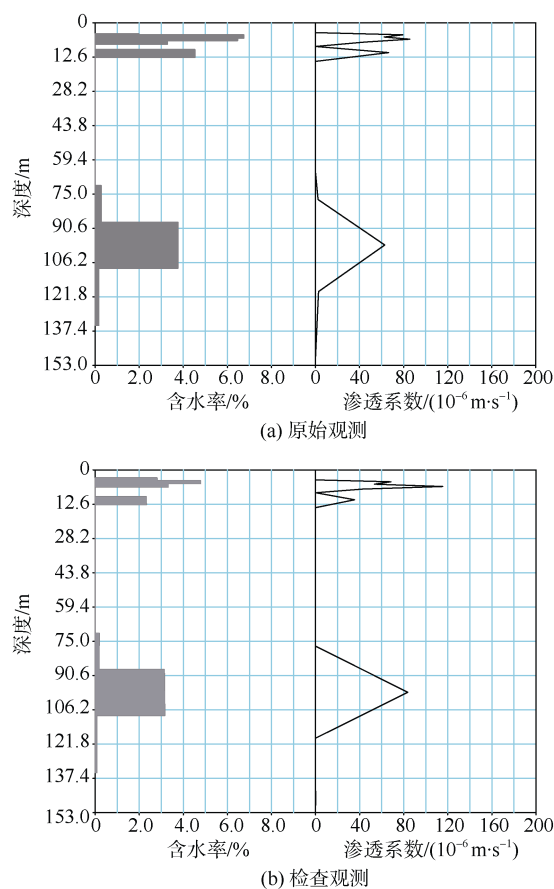


图4 D7 质量检查点一维反演

Fig.4 D7 quality check point one-dimensional inversion

由上述 2 个质量检查点的检查结果可见,本次地面核磁共振法采集数据满足规范要求,工作质量可靠。

#### 4 SNMR 断面等值线图结果分析

本次地面核磁共振工作测线共布置 5 条,笔者选取其中经过测点质量评价的 AA'、DD' 两条测线来进行分析。

##### 4.1 AA' 测线断面

AA' 测线长度 1 500 m,完成 SNMR 测点 13 个,其中加密点 2 个。该测线含水率和渗透系数的断面等值线如图 5 所示。

由图 5 可知,该测线由浅及深存在 2 个含水层



位：浅表含水层和高程 1 180~1 220 m 含水层。

### 1) 浅表含水层

该含水层为第四系砂层，其富水性受砂层厚度

及其下隔水层(离石组黄土及保德组红土)顶部起伏形态影响差异明显，A8—A11 号点、A14—A17 号点段相对富水。

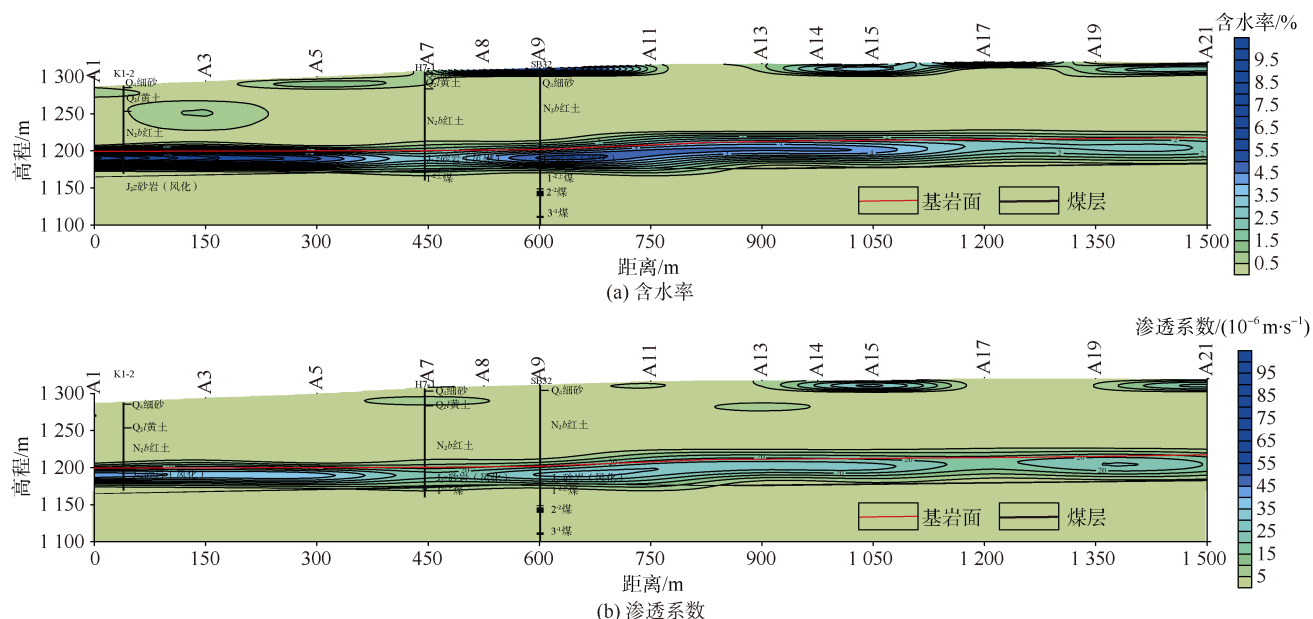


图 5 AA' 测线 SNMR 断面等值线

Fig.5 SNMR section contour of line AA'

### 2) 高程 1 180~1 220 m 含水层

该含水层全线均有发育，各测点反演计算含水率为 2.73%~8.21%，渗透系数为  $(21.2\sim44.3)\times 10^{-6}$  m/s。含水率和渗透系数最大值点位于测线西南端 A1 号点；A8—A15 号点段含水率和渗透系数值相对较高，富水性相对较强；A7 号点和 A17 号点含水率和渗透系数值相对较低，富水性相对较弱。

依据测线附近钻探资料，该测线所测含水层高程与钻孔所得基本一致，测线高程 1 180~1 220 m 为  $1^{-2}$  煤层与侏罗系顶部基岩风化层段。而测线  $1^{-2}$  煤层与基岩风化层底间距为 0~6 m，目前地面核磁共振法的结果无法将 100 m 以内的  $1^{-2}$  煤火烧区孔隙含水层与该基岩风化裂隙含水层精确划分。因此，将高程 1 180~1 220 m 含水层解释为  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层(包括基岩风化裂隙含水层及局部可能存在的  $1^{-2}$  煤火烧区孔隙含水层)。

### 4.2 DD' 测线断面

DD' 测线长度 1 650 m，完成 SNMR 测点 16 个，其中加密点 4 个。该测线含水率和渗透系数的断面等值线如图 6 所示。

由图 6 可知，该测线由浅及深存在 2 个含水层位：浅表含水层和高程 1 170~1 235 m 含水层。

### 1) 浅表含水层

该含水层为第四系砂层，其富水性受砂层厚度

及其下隔水层(离石组黄土及保德组红土)顶部起伏形态影响差异明显，D3 号点、D7—D8 号点、D15—D20 号点和 D23 号点段相对富水。

### 2) 高程 1 170~1 235 m 含水层

该含水层全线均有发育，各测点反演计算含水率为 3.17%~4.57%，渗透系数为  $(21.8\sim41.7)\times 10^{-6}$  m/s。含水率最大值为 D13 号点，渗透系数最大值为 D17 号点；D1—D3 号点、D8—D18 号点段含水率值相对较高，富水性相对较强；D5 号点、D20—D21 号点段含水率和渗透系数值相对较低，富水性相对较弱。

依据测线附近钻探资料，该测线所测含水层高程与钻孔所得基本一致，测线高程 1 170~1 235 m 为  $1^{-2}$  煤层与侏罗系顶部基岩风化层段。而测线  $1^{-2}$  煤层与基岩风化层底间距为 0~3.3 m。与前述同理，将高程 1 170~1 235 m 含水层解释为  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层，DD' 测线所测  $1^{-2}$  煤上覆基岩高程与钻孔结果基本一致。

## 5 SNMR 平面等值线图分析及验证

### 5.1 SNMR 平面等值线图分析

综合各测线地面核磁共振法成果解释，本勘查区有 2 个含水层位：第四系松散砂层含水层和  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层。

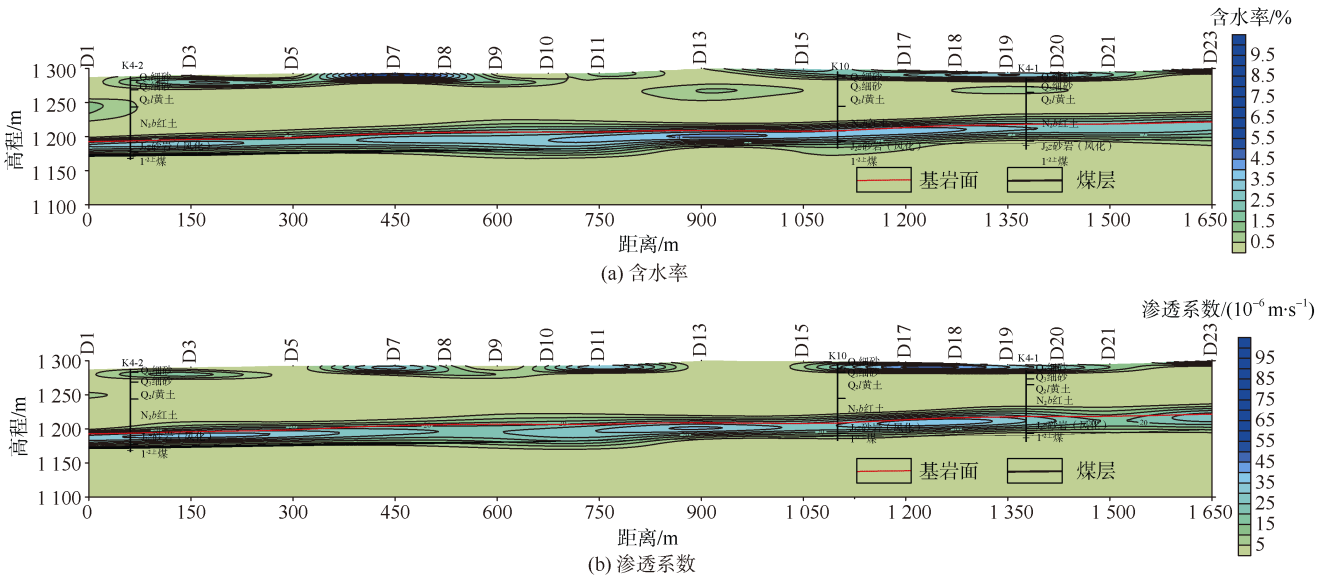


图 6 DD' 测线 SMNR 断面等值线  
Fig.6 SNMR section contour of line DD'

本次物探的主要目的层是  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层。以隐伏火烧区探查阶段的核磁共振勘探资料为基础，分析隐伏火烧区及其周边  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层的含水率和渗透系数空间分布特征，并获得了  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层横向上富水性、渗透性分布状态(图 7)。

由图 7a 可知，根据核磁共振勘探法结果，隐伏火烧区及其周边  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层的含水率一般为 2%~8%。其中隐伏火烧区钻孔 BK42 东侧一带以及中部偏西北部的 K9 钻孔附近的含水率相对较低；而隐伏火烧区的中部、西部以及西南侧一带的含水率较高，最高达到 8.2 %。

根据图 7b 可知，隐伏火烧区及其周边  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层的渗透系数一般为  $(20\sim45)\times10^{-6}$  m/s。其中隐伏火烧区中部偏东南区域附近渗透系数相对较大，隐伏火烧区外的西南部一带渗透系数也相对较大，其他区域为渗透系数相对较低的区域。

5.2 SNMR 分析结果验证

5.2.1 水文孔

为验证 SNMR 富水性探测结果的准确性，选取柠条塔隐伏火烧区附近 5 组水文孔数据进行验证，所选水文孔抽水层皆为风化基岩含水层或风化基岩与烧变岩组成的复合含水层，由图 7 可知，含水率与渗透系数较大的区域钻孔涌水量也相对较大，其中相对其他区域 K9 钻孔附近地区预测值与钻孔涌水量有差异，但误差较小为正常误差范围。

5.2.2 井下探放水孔

为验证 SNMR 富水性探测结果的准确性，将

上述结果与柠条塔煤矿南翼 S1233 工作面井下探放水孔的涌水量进行对比分析(图 7)。所有探放水钻孔均打穿风化基岩含水层，探放水 X6、X7 钻

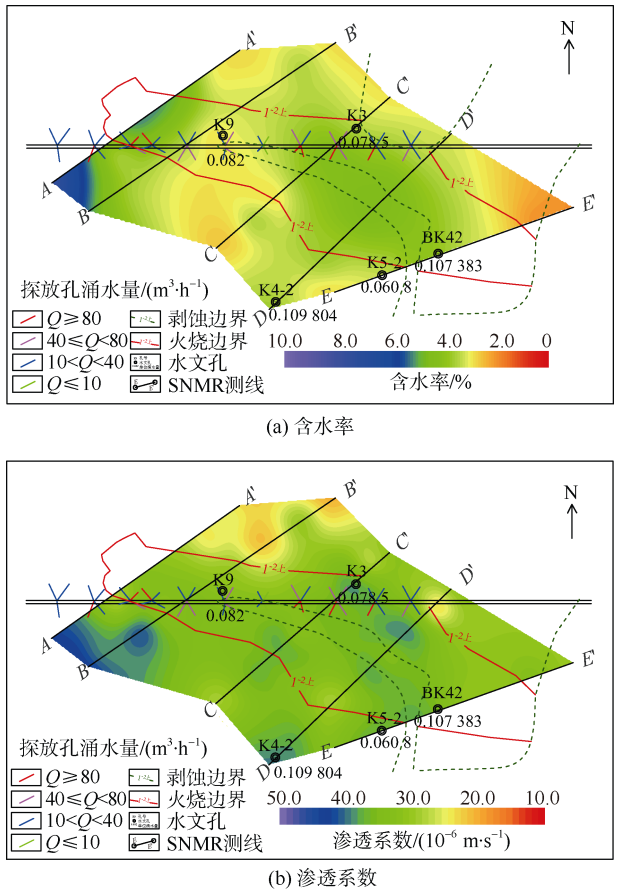


图 7 研究区  $1^{-2}$  煤上覆基岩含水层水文地质参数  
Fig.7 Hydrogeological map of the  $1^{-2}$  coal overlying bedrock aquifer in the study area

孔附近与上述 K9 水文孔位于同一区域,其误差原因同上(探放水钻孔具体数据见表 1、图 8),整体

表 1 S1233 工作面井下探放水钻孔涌水量  
Table 1 Water gushing by underground water exploration and drilling in working face S1233

编号	孔号	孔深/ m	涌水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	编号	孔号	孔深/ m	涌水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	Y3-1	134	27.7	7	X7-1	84	13
	Y3-2	127	14.4		X7-2	82.5	10
	Y3-3	132	20		X7-3	81.5	18
2	X4-1	127	30		X7-4	66	6
	X4-2	123	16	8	X8-1	142	54
	X4-3	130	95		X8-2	136	27
	X4-4	129	30		X8-3	93	130
3	F1	127.5	31		X8-4	89	108
	F2	102	25	9	X9-1	126	50.4
	F3	108	48		X9-2	120	45.8
	F4	126	51		X9-3	120	77.1
4	F5	129	77		X9-4	128	90
	F6	111	24	10	X10-1	123	24
	F7	109	25		X10-2	120	40
	F8	123	23		X10-3	125	20
5	X5-1	129	13		X10-4	126	144
	X5-2	123	18	11	X11-1	125	33
	X5-3	126	46		X11-2	122	14
	X5-4	138	56		X11-3	123	35
6	X6-1	121	15		X11-4	133	58
	X6-2	123	70				
	X6-3	97	25				
	X6-4	93	50				

上 SNMR 富水性探测结果相对较强的区域,探放水孔的涌水量也相对较大,且巷道向南侧施工的探放水孔涌水量普遍大于巷道北侧区域,与预测结果基本一致,反映当前隐伏火烧区含水层富水性探测效果较好。

从整体来看,利用核磁共振勘探法获得的 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层的含水率及渗透系数的分布特征与井下探放水孔的涌水量特征大致相同,表明该方法的勘探结果相对可靠,能够作为隐伏火烧区含水层富水性综合评价的重要依据。

6 结 论

a. 隐伏火烧区共有第四系松散砂层含水层和 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层 2 个层位。受地表地形及其下隔水层顶部起伏形态影响,第四系砂层含水层富水性水平变化较大。1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层富水性总体西南较低、北东较高,该含水层厚度 9~30 m,局部相对较厚,推测为 1<sup>-2</sup> 煤火烧区风化基岩和烧变岩含水层的叠加反映。

b. 根据含水率和渗透系数空间分布规律,研究区内 1<sup>-2</sup> 煤上覆基岩含水层总体西部及中部偏东南区域富水性相对较大,其余区域相对较小。

c. 利用核磁共振勘探法得到的结论与水文孔及井下探放水孔的验证结果大致相同,表明该方法的勘探结果相对可靠,可用于隐伏火烧区富水性的探测。

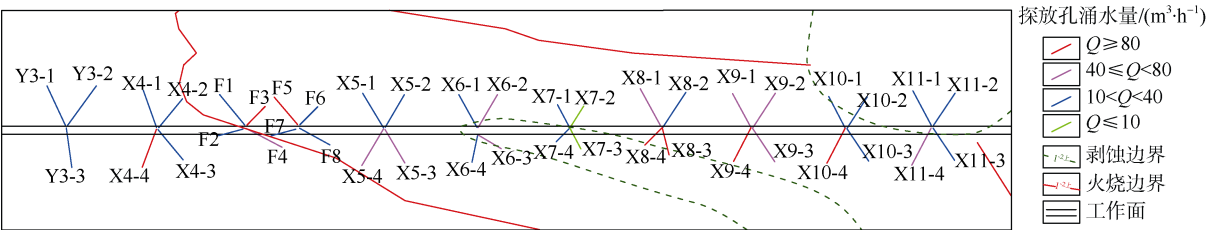


图 8 S1233 工作面井下探放水钻孔分布

Fig.8 Boreholes layout of underground exploration and drilling in working face S1233

参考文献(References)

[1] 杜中宁, 党学亚, 卢娜. 陕北能源化工基地烧变岩的分布特征及水文地质意义[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1168–1172.  
DU Zhongning, DANG Xueya, LU Na. Distribution characteristics of burnt metamorphic rocks in the Northern Shaanxi Energy and Chemical Industry Base, China and their hydro-geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1168–1172.

[2] 侯恩科, 陈培亨. 神府煤田煤层自燃研究[J]. 西安矿业学院学报, 1993(2): 137–142.  
HOU Enke, CHEN Peiheng. Study on spontaneous combustion

of coal seams in Shenfu coal field[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1993(2): 137–142.

[3] 侯恩科, 童仁剑, 冯洁, 等. 烧变岩富水特征与采动水量损失预计[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 175–182.  
HOU Enke, TONG Renjian, FENG Jie, et al. Water enrichment characteristics of burnt rock and prediction on water loss caused by coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 175–182.

[4] 侯恩科, 闫鑫, 郑永飞, 等. Bayes 判别模型在风化基岩富水性预测中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(6): 942–949.  
HOU Enke, YAN Xin, ZHENG Yongfei, et al. Application of Bayes discriminant model in prediction of water enrichment of



- weathered bedrock[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(6): 942-949.
- [5] 董震雨, 王双明. 采煤对陕北榆溪河流域地下水资源的影响分析: 以杭来湾煤矿开采区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 185-190.
- DONG Zhenyu, WANG Shuangming. Influence of coal exploitation on groundwater resources in Yuxi river valley of northern Shaanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(3): 185-190.
- [6] 张志祥, 张永波, 付兴涛, 等. 煤矿开采对地下水破坏机理及其影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 211-213.
- ZHANG Zhixiang, ZHANG Yongbo, FU Xingtao, et al. Study of destruction mechanism of coal mining on groundwater and its influencing factors[J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 211-213.
- [7] 张渝, 胡社荣, 彭纪超, 等. 中国北方煤层自燃产物分类及宏观模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1798-1805.
- ZHANG Yu, HU Sherong, PENG Jichao, et al. Metamorphic products of coal combustion and its macroscopic models in North China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1798-1805.
- [8] 黄雷, 刘池洋. 鄂尔多斯盆地北部地区延安组煤层自燃烧变产物及其特征[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1753-1761.
- HUANG Lei, LIU Chiyang. Products of combustion of the Yanan Formation coal seam and their characteristics in the northeastern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1753-1761.
- [9] 李峰, 刘鸿福, 张新军, 等. 基于分形理论确定地下煤层自燃火区范围[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 15-17.
- LI Feng, LIU Hongfu, ZHANG Xinjun, et al. Determination of spontaneous combustion extent in coal seams on the basis of the fractal theory[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 15-17.
- [10] 花育才, 孟红星, 孙耀峰. 磁法和瞬变电磁法探测煤层火烧区边界及富水性[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(8): 80-84.
- HUA Yucai, MENG Hongxing, SUN Yaofeng. Coal seam burning area boundary and water yield property detection through magnetic method and transient electro-magnetic method(TEM)[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(8): 80-84.
- [11] 秦守萍, 宋建华, 白述超, 等. 高精度磁法在伊昭井田隐伏火烧区探测中的应用[J]. 山东国土资源, 2017, 33(10): 57-61.
- QIN Shouping, SONG Jianhua, BAI Shuchao, et al. Application of high precision magnetic survey for detecting concealed burning area in Yizhao coal well[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(10): 57-61.
- [12] 张振勇. TEM 技术在岩层富水性探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 109-113.
- ZHANG Zhenyong. Application of TEM technique in detecting the water enrichment of strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 109-113.
- [13] 刘大为, 刘天佑, 董建华. 小波多尺度分析在煤田火烧区磁法探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6): 61-63.
- LIU Dawei, LIU Tianyou, DONG Jianhua. Application of wavelet multi-scale analysis in magnetic prospecting of the burnt coal area[J]. Coal Geology and Exploration, 2005, 33(6): 61-63.
- [14] 宋业杰, 甘志超. 榆神矿区烧变岩水害防治技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 92-96.
- SONG Yejie, GAN Zhichao. Water hazard treatment for burnt rock aquifer in Yushen mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(8): 92-96.
- [15] 王逗. 核磁共振原理及其应用[J]. 现代物理知识, 2005(5): 50-51.
- WANG Dou. Principle and application of nuclear magnetic resonance[J]. Modern Physics, 2005(5): 50-51.
- [16] WEICHMAN P B, LAVELY E M, RITZWOLLER M H. Surface nuclear magnetic resonance imaging of large system[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(20): 4102-4105.
- [17] 邓靖武, 潘玉玲, 熊玉珍. 探查地下水的新方法: 地面核磁共振找水方法的应用研究[J]. 现代地质, 2004, 18(1): 121-126.
- DENG Jingwu, PAN Yuling, XIONG Yuzhen. Applied research of a new method for detecting groundwater: SNMR detection groundwater method[J]. Geoscience, 2004, 18(1): 121-126.
- [18] FITTERMAN D V, MARK T. Stewart transient electromagnetic sounding for groundwater[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 995-1005.
- [19] 李振宇, 潘玉玲, 张兵, 等. 利用核磁共振方法研究水文地质问题及应用实例[J]. 水文地质工程地质, 2003(4): 50-54.
- LI Zhenyu, PAN Yuling, ZHANG Bing, et al. Using NMR method research the hydrogeology problems and practical examples[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003(4): 50-54.
- [20] 孙淑琴, 林君, 张庆文, 等. 氢质子弛豫过程[J]. 物探与化探, 2005, 29(2): 153-156.
- SUN Shuqin, LIN Jun, ZHANG Qingwen, et al. The investigation of hydrogen macroscopic nuclear relaxation[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 29(2): 153-156.
- [21] 王光海, 李高明. 用核磁共振测井确定渗透率的原理和方法分析[J]. 测井技术, 2001, 25(2): 101-104.
- WANG Guanghai, LI Gaoming. On method and principle of determining permeability with NMR[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(2): 101-104.
- [22] 贺超. 核磁共振成像系统原理及 MR 图像研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2010, 32(增刊 1): 245-248.
- HE Chao. The study of principle of nuclear magnetic resonance imaging and MR image[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2010, 32(Sup.1): 245-248.

(责任编辑 聂爱兰)