

芦俊,王赞,赵伟.应用三分量地震数据反演煤系地层孔隙含水量.地球物理学报,2010,53(7):1734~1740,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.025

Lu J, Wang Y, Zhao W. Quantitative prediction of water content in porosity in coal measure strata using three-component seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(7):1734~1740, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.025

## 应用三分量地震数据反演煤系地层孔隙含水量

芦俊<sup>1</sup>,王赞<sup>2\*</sup>,赵伟<sup>3</sup>

1 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

2 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002

3 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,安徽淮南 232052

**摘 要** 地层孔隙水含量的计算主要受地层孔隙度与孔隙含水饱和度的影响.通过实验室煤层及其顶底板岩芯物理测试与孔隙度测量,可以获得煤系地层岩芯的孔隙度与岩芯纵、横波速度的经验公式;结合三分量地震勘探获得的纵波与横波速度,能够计算出煤系地层的孔隙度;含水饱和度的计算通过实验室岩电参数测试和阿尔奇公式可以计算得到.结合淮南某矿区三维三分量地震勘探和地球物理测井及岩样的岩电试验,实现了三维空间煤系地层孔隙含水体积百分比的精确计算.该预测方法与传统的、钻孔控制的地下水评价方法相比可以提供相对精细的、三维空间的、量化的煤系地层孔隙相对含水量,对煤炭与煤层气资源开采中所涉及的地下水分布规律预测有一定的参考意义.

**关键词** 含水量,孔隙度,含水饱和度,煤层,三维三分量地震勘探

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.025

中图分类号 P631

收稿日期 2009-09-01,2010-06-24 收修定稿

### Quantitative prediction of water content in porosity in coal measure strata using three-component seismic data

LU Jun<sup>1</sup>, WANG Yun<sup>2\*</sup>, ZHAO Wei<sup>3</sup>

1 School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

3 State Engineering Research Center of Coal Gas Control, Anhui Huainan 232052, China

**Abstract** The calculation of water content of subsurface formations is mainly influenced by the porosity and saturation. Through laboratory tests of core samples of coal seam and its roof and floor, the relations between porosity and compressional and shear wave velocities are statistically set up. Then combined with the P- and S-wave velocities inversed from 3-component seismic exploration, 3-dimensional porosity data of the coal measure strata are calculated. By the lithological-electrical parameters testing results and Archie Formula, the water saturation of subsurface formations is derived. With the methods above, predictions of comparative water content in three coal seams were tried in Huainan Coal Field; with the help of 3D three-component seismic data, well logging and samples tests, quantitative prediction of 3-dimensional water content of the coal seam is realized. Compared with conventional methods such as borehole

**基金项目** 国家重点基础研究计划(973)(2006CB202207),国家重大专项(2008ZX05035-001-003,2008ZX05035-003-006HZ,2008ZX05008-006-004)资助.

**作者简介** 芦俊,男,1980年生,博士后,讲师,现在中国地质大学(北京)能源学院从事三分量地震技术研究工作. E-mail: lujun615@163.com

\* **通讯作者** 王赞. E-mail: wangyun@mails.gyig.ac.cn

controlled evaluation, the new method can calculate 3-dimensional water content in a relatively fine and quantitative way, and the method may provide useful references for estimating water content distribution in coal and gas exploitation.

**Keywords** Water content, Porosity, Saturation, Coal seam, 3D3C seismic exploration

## 1 引言

在煤炭与煤层气资源的开采过程中,地下水地质条件与地下水发育情况是关键的控制因素之一<sup>[1, 2]</sup>. 常规的地下水地质条件的研究是通过钻孔及其相关测试完成的,由于钻孔成本高、数量少的原因,对地下水发育情况的预测精度有限,尤其在钻孔较少地区和横向分布规律的认识上<sup>[3, 4]</sup>. 由于煤系地层水的发育情况对于煤炭的安全生产以及煤层气储层的评价至关重要,有限的钻孔信息已经不能满足勘探需求. 所以研究煤系地层含水量的定量计算方法,并对煤系地层的含水量进行三维空间预测,是目前煤田地球物理勘探急需解决的难题.

利用三维地震数据反演地层孔隙度与含水饱和度,进而对地层含水量进行估算,是油气勘探中进行储层预测的常用手段. 但是该方法目前尚未在国内的煤田得到应用,其原因主要在于煤田缺乏一些反演中用到的岩石物理与岩电参数测试的数据以及回归关系<sup>[5~7]</sup>. 由于最近几年,三维三分量地震勘探技术在煤田得到一定程度的应用,本文以淮南顾桥矿区为例,提出一种利用三维三分量地震数据与测井数据进行联合反演孔隙度与含水饱和度,从而达到预测地层含水量的方法;其中孔隙度的反演采用了双波速方程法,而含水饱和度的计算则采用了阿尔奇公式.

## 2 含水量计算方法

地下水一般赋存在岩石的孔隙中,按照不同的孔隙性质,地下水又可分为孔隙水、裂隙水和岩溶水三种类型<sup>[8]</sup>, 这里的地层含水量不包括岩溶水,而是特指赋存在基质孔隙和裂隙孔隙中的水. 岩石中基质孔隙和裂隙孔隙总体积与岩石体积的比为岩石的总孔隙度;若获得岩石的总孔隙度与孔隙的含水饱和度,就可以计算岩石中水的体积与岩石体积之比,即含水量<sup>[9]</sup>:

$$w = \phi \times S_w, \quad (1)$$

其中,  $w$  为含水量, 体积百分比,  $\phi$  为总孔隙度;  $S_w$

为含水饱和度, 其主要计算公式为阿尔奇公式<sup>[10, 11]</sup>

$$S_w = \left( \frac{abR_w}{\phi^m R_i} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (2)$$

式中,  $R_w$ 、 $R_i$  分别为地层水电阻率以及地层电阻率,  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  称为岩电参数, 无量纲, 其中  $m$  反映胶结程度,  $n$  为饱和度指数.

从公式(2)可以看出, 含水饱和度计算涉及多个参数; 其中地层电阻率需要通过电测井获得, 或通过井震联合反演得到<sup>[12~13]</sup>; 地层水电阻率一般需要取样测量, 也可以在实验室模拟盐水测量; 岩电参数在不同地区差异很大, 需要进行岩电实验测量<sup>[14]</sup>.

孔隙度对于含水量的计算是个至关重要的参数, 目前利用地震资料预测孔隙度已经发展成为比较成熟的储层预测技术, 比较常用的方法有: 时间平均(Wyllie)方程法、波阻抗换算法、波速拟合法等. 这些方法都需要提供多种参数的先验地质信息, 且预测精度的高低直接受制于所能提供的先验信息的数量与精确度, 但很多先验信息, 如泥质含量、骨架速度等在煤田上都是很难准确得到的.

本文采用一种综合使用纵、横波速度的双波速方法计算岩石的孔隙度. 朱广生<sup>[15]</sup>通过大量的实验室数据和实际井孔数据进行测试, 发现双波速估算孔隙度可以避免泥质含量这个难以求准的参数, 只需要纵、横波速度就可达到较高的精度. 但是双波速估算孔隙度的方法一直没有得到广泛的推广应用, 其主要原因是地震勘探工区缺乏精确的横波速度资料. 目前, 三维三分量(3D3C)地震已经成为重要的地震勘探手段, 并且在煤田得到了一定程度的应用; 在测井数据的约束下, 三维三分量地震反演可以得到相对较为精确的P波、S波速度, 这也使得“地震双波速法”预测孔隙度成为可能.

地层电阻率需要通过反演得到, 但是由于地层电阻率与弹性参数间难以建立先验的数学模型, 这就为利用地震数据反演电阻率造成困难. 本文应用人工智能神经网络技术对电阻率测井数据与反演的波阻抗数据进行定量回归分析, 可以隐式建立电阻率测井响应与弹性参数之间的复杂关系, 实现电阻率的非线性反演<sup>[12~13]</sup>.

### 3 实例研究

利用地震资料和测井数据、岩石物理试验估算岩层含水量,涉及到多个参数的测定,一直是地震勘探的难题,以下将结合淮南顾桥矿区的实例进行说明。

#### 3.1 双波速法计算岩石孔隙度

顾桥矿区进行了全井段取芯和地球物理测井,通过钻孔取芯的 35 块岩样的实验室测量,得出该矿区总孔隙度与 P、S 波速度的关系如图 1 所示,对图中的散点通过二元回归分析得到回归关系为

$$\phi = 146 - 18.665\log_{10}(v_p) - 21.7\log_{10}(v_s), \quad (3)$$

其中  $v_p$  为 P 波速度,  $v_s$  为 S 波速度,单位 m/s. 用上式对岩样的孔隙度进行估算并与实测结果进行比较,如图 2 所示,估算值与实测值之间吻合程度较高。

应用顾桥矿区三维三分量地震数据结合横波偶极子测井进行 PP 波、PS 波联合反演可以获得 P 波速度与 S 波速度三维数据体<sup>[16, 17]</sup>,用公式(3)即可以实现应用纵、横波速度计算孔隙度。图 3 所示为过补 2 井的 113 线的孔隙度剖面。从图上可以看到煤层、新生界欠压实地层、风化剥蚀的新生界底具有较大孔隙度;1 煤下方灰岩孔隙度最低;煤系地层中的砂泥岩孔隙度较低;孔隙度的这一分层特点与岩层的压实程度和岩性、沉积特点非常吻合,与钻孔描述对应。

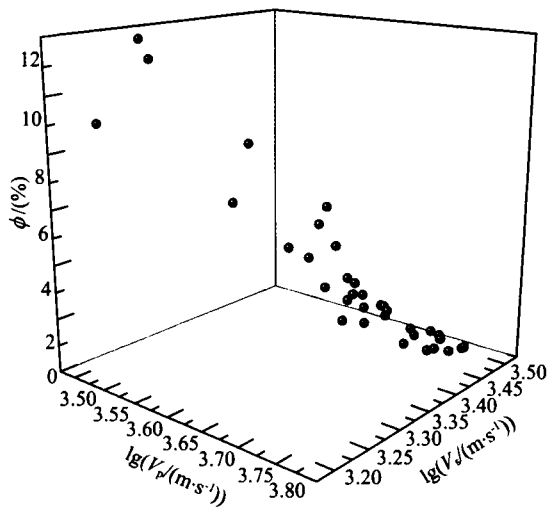


图 1 孔隙度  $\phi$  与  $v_p$ 、 $v_s$  的关系(实验数据)

Fig. 1 Relations between porosity  $\phi$  and  $v_p$ ,  $v_s$

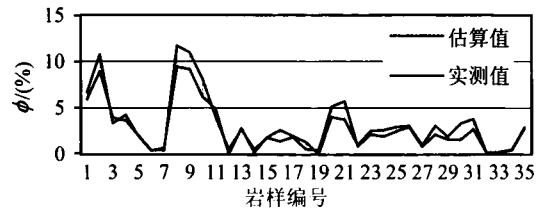


图 2 双波速法求取的孔隙度与实测孔隙度对比

Fig. 2 Comparison between the porosities calculated by double-wave-velocity method and by actual measurement

#### 3.2 岩电试验

由于煤岩的易碎性,难以进行岩电实验,所以主要取煤层顶底板中靠近煤层的含炭量较高的砂泥岩岩芯进行岩电实验分析.受岩芯数目限制, $a$ 、 $m$  难以回归得到,因此对每组层采用  $a = 1$ ,  $m$  取平均值的方法,回归得到  $b$ 、 $n$ ,各层段岩电参数如表 1 所示.最终得出岩电参数的均值: $a = 1$ 、 $b = 1.0008$ 、 $m = 1.1726$ 、 $n = 1.1516$ ,这样反演得到的含水饱和度主要反映相对关系。

表 1 淮南顾桥矿区煤系地层岩电参数表

Table 1 The lithological-electrical parameters of coal measure strata in Huainan

层段	$a=1$ , $m$ 均值	$n$	$b$	相关系数 $R^2$
新生界底	1.3159	1.1252	0.9991	0.9937
13-1 煤顶板	1.0231	1.0872	1.0025	0.9956
13-1 煤底板	1.1358	1.1672	1.0046	0.9967
11-2 煤底板	1.0209	1.0761	1.0055	0.9979
8 煤顶板	1.202	1.2109	0.9903	0.9918
8 煤底板	1.2284	1.1371	1.0002	0.9954
6 煤顶板	1.3604	1.0888	0.9982	0.966
6 煤底板	1.1325	1.1077	0.999	0.9954
1 煤顶板	1.1758	1.29	0.9966	0.9775
1 煤底板	1.1324	1.1961	1.0023	0.9925
灰岩	1.1712	1.1808	1.0106	0.9815
平均	1.1726	1.1516	1.0008	0.9895

#### 3.3 地层电阻率的求解

顾桥矿区水文调查资料表明,三维地震工区内煤系地层含水主要为盐水,电性测井过程中实测地层水电阻率  $R_w$  平均为 1.2263  $\Omega m$ .而对于地层电阻率的求取,我们采用神经网络方法反演地层的电阻率。图 4 是用神经网络方法反演的过补 2 井的 113 线电阻率剖面,可见煤的电阻率主要分布在 60~160  $\Omega m$  之间,与砂泥岩相比横向不均匀性

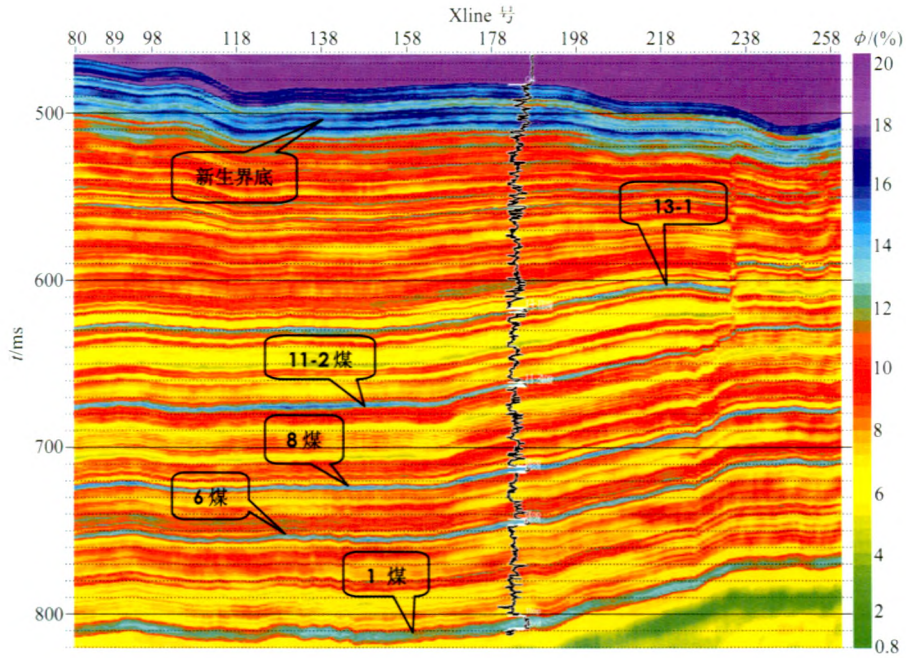


图 3 过补 2 井 113 线孔隙度剖面

Fig. 3 The porosity profile of inline113 across the well Bu2

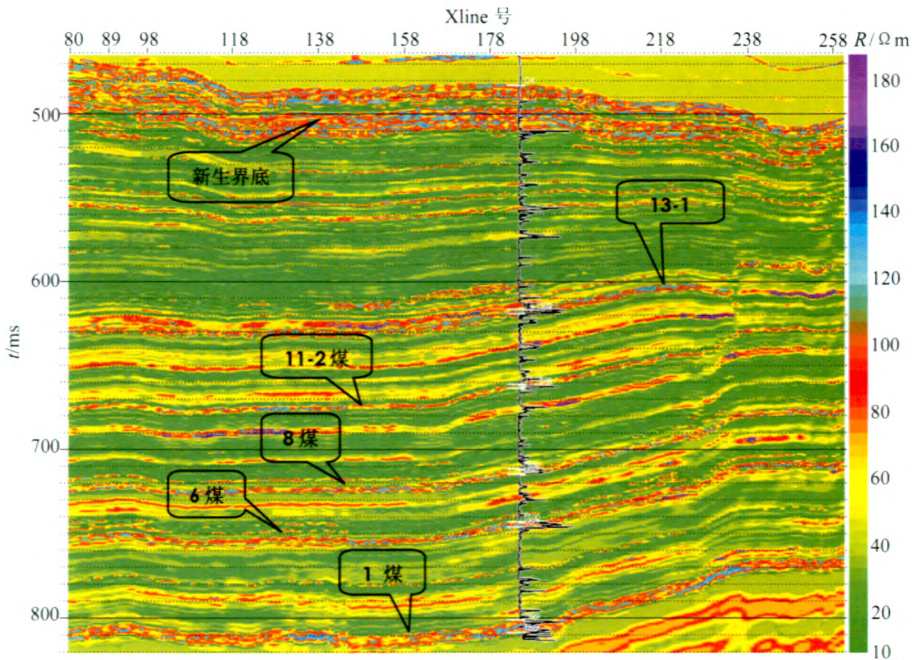


图 4 过补 2 井 113 线电阻率剖面

Fig. 4 The resistivity profile of inline113 across the well Bu2

较强;新生界底的风化层视电阻率不均匀性较强,且电阻率变化范围较大,这与该风化剥蚀面的横向非均一性有关;而新生界地层、煤层顶底板的砂泥岩和石炭系灰岩电阻率变化范围较小,横向相对连续。

### 3.4 含水量计算

根据前述的公式(1)和公式(2)就可以计算地层的含水量.图 5 所示为通过阿尔奇公式计算的过补

2 井 113 线的相对含水饱和度剖面.图 6 为利用公式(1)反演得到的地层含水量剖面,图中蓝色与紫色指示含水量较高.从图 6 上可见:区域内以砂泥岩孔隙含水为主;地层含水量较大的区域主要分布在第四系底;新生界的孔隙水与石炭系的灰岩水相对较少;煤层含水量小,横向变化不大;而且随着煤层埋深的增大,6、1 煤的含水量相对较小。



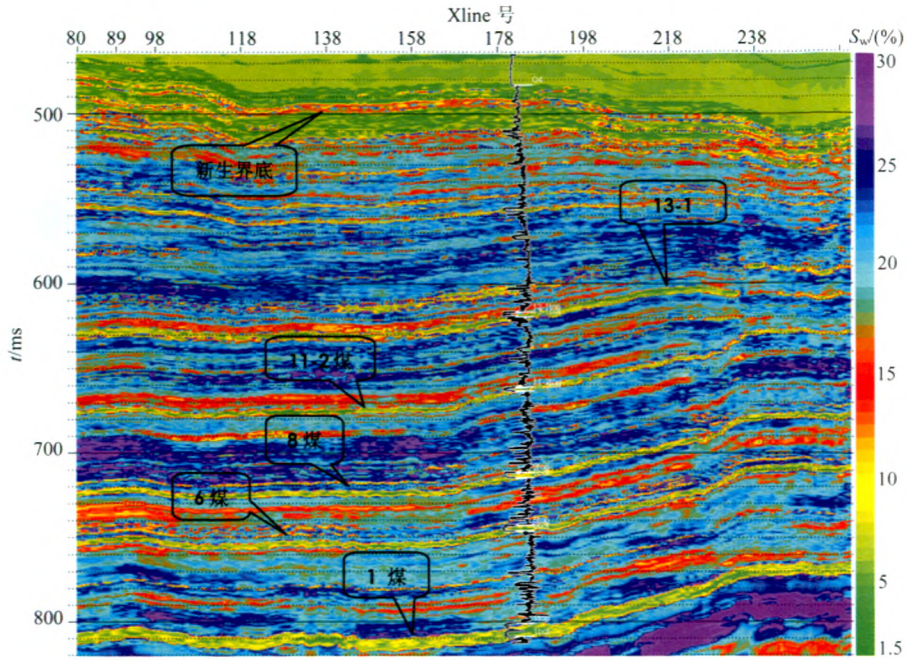


图 5 过补 2 井 113 线相对含水饱和度剖面

Fig. 5 The relative water saturation profile of inline113 across the well Bu2

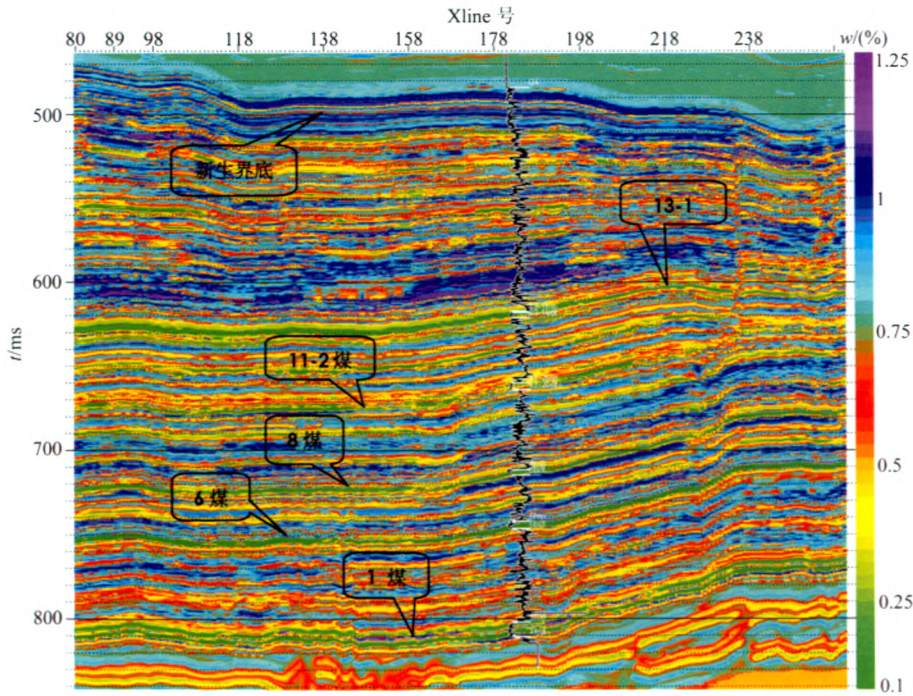


图 6 过补 2 井 113 线含水量剖面

Fig. 6 The water content profile of inline113 across the well Bu2

应用三维三分量地震的优势不仅可以获得三维的地层含水量数据体,便于对各个地层或层系通过剖面 and 水平切片的方式综合分析含水性,而且双速度法预测的地层孔隙度相对单纯,纵波速度预测孔隙度精度要高.例如,在前面测井层位标定的基础

上,对反演的含水量数据体沿第四系底提取得到图 7 所示的第四系底含水量切片图,可见第四系底的含水量变化较大;图中的深蓝色异常指示在西北部 F87 断层带(椭圆框标识处)存在含水量较大的区域.



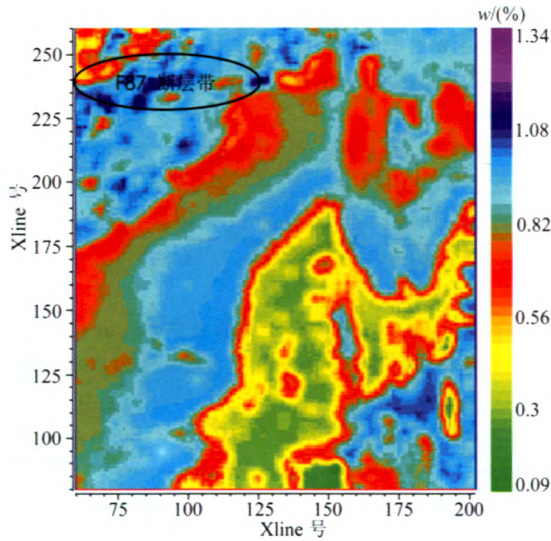


图7 第四系底含水量图

Fig. 7 The water content at the bottom of the Q4

图8是13-1煤及其顶、底板的含水量切片图,从图上可以看到:13-1煤及其顶、底板含水量都较小,顶板含水量主要为0.4%~1%之间,F87与F119断层相交区域的含水量相对较大,原因是该处的裂隙较为发育.13-1煤的含水量较小,大多数区域的含水量小于0.1%;在北部F87断层两侧的含水量相对较多,但未超过1%.13-1煤底板的含水量比顶板稍高,分布范围在0.4%~1%之间,含水量接近0.9%的区域较多,但也未见含水量存在高异常;13-1煤底板在F87与F119断层带上的含水量较小,原因可能是断层带被泥沙等充填后重新胶结所致.从矿方反馈的水文地质资料表明,该方法反演得到的地层含水量能较好反映地层含水量大小的相对关系,并且13-1煤的含水量与煤质化验得到的结果吻合.

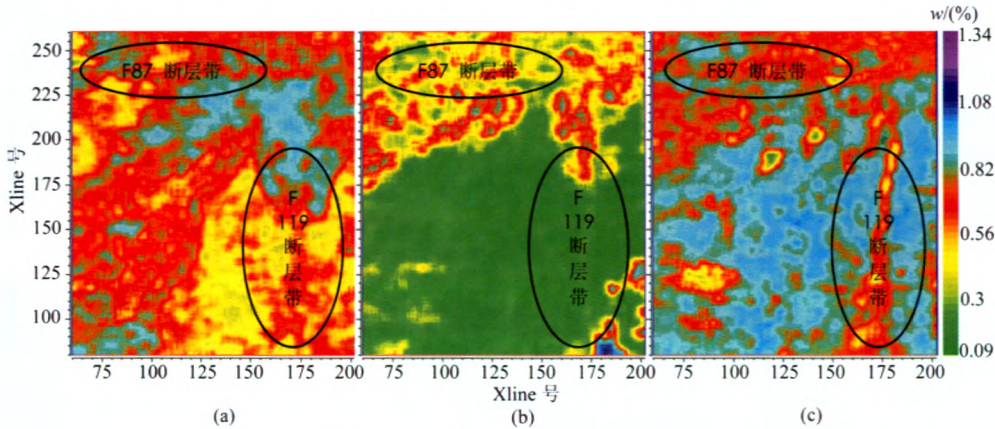


图8 13-1煤及其顶、底板含水量图

(a)顶板;(b)煤层;(c)底板.

Fig. 8 The water contents of 13-1 coal seam and its roof and bottom

## 4 几点认识与结论

本文主要介绍了将油气勘探中通用的孔隙度和孔隙含水率预测的方法应用于煤田勘探的方法原理及实现过程;并结合淮南顾桥煤矿三维三分量地震勘探的实例,重点阐述了应用三分量地震数据,结合钻孔和地球物理测井综合、定量预测煤系地层孔隙含水率的方法.通过本文介绍方法的研究和应用实例,可以获得以下结论与认识.

(1)应用三维三分量地震,结合钻孔和测井数据,通过井震联合反演,在精确计算煤系地层纵、横波速度的基础上,可以实现煤系地层孔隙含水率体积百分比的三维空间预测.虽然这样定量计算方法的精度有待于实际井下巷道采煤时见水记录数据的验

证,但作为富水性的相对指示是有意义的.尤其通过与构造、沉积等地质条件的综合分析,可以提高地下静态水文地质条件评价的精度,实现量化,值得在实际应用中推广.

(2)但这一方法流程还有诸多问题值得深入研究与进一步完善.例如,由于煤岩的易碎性,造成实验室测量的煤岩孔隙度与波速数据点偏少,煤岩的孔隙度计算可能存在较大误差;其次,由于煤岩岩芯在实验室常温常压下的孔缝结构与地下原位温压状态下的孔缝结构有较大差异,此时预测的煤岩孔隙度对于地下实际的煤岩孔隙度只有相对的指示意义.另外,由于阿尔奇公式是基于砂泥岩模型假设的含水饱和度与地层因素的关系式,应用在煤岩上的可靠性值得进一步的、大量的试验测量;针对煤岩的含水饱和度量化计算需要加强实验室与基础理论

## 方法的研究.

## 参考文献(References)

- [1] 高洪烈. 论煤层气与地下水. 中国煤田地质, 1998, 10(4): 45~48  
Gao H L. Discuss of coal gas and subsurface water. *Coal Geology of China* (in Chinese), 1998, 10(4): 45~48
- [2] 张占存. 水份对煤的瓦斯吸附特性影响的实验研究[硕士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2004  
Zhang Z C. Experimental Research on Moisture Effects on the Gas Absorption Specialty of Coal [Master's degree thesis]. Beijing: China Coal Research Institute, 2004
- [3] 王国玲, 秦勇. 煤储层含气性特征及其地质动力学控制因素. 中国煤炭地质, 2009, 21(2): 18~23  
Wang G L, Qin Y. Gas-bearing characteristics of coal reservoirs and their geological dynamic controlling factors. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2009, 21(2): 18~23
- [4] 赵玉琳, 尹世才, 王海泉. 奥陶系灰岩富水区带划分的综合水文地质研究. 煤炭技术, 2008, 27(11): 114~116  
Zhao Y L, Yin S C, Wang H Q. Hydro-geological study of water abundant area division in ordovician limestone aquifer. *Coal Technology* (in Chinese), 2008, 27(11): 114~116
- [5] 吴钦宝, 王秀东, 宁方助. 煤田三维地震勘探的应用及效果分析. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 377~380  
Wu Q B, Wang X D, Ning F Z. Application and analysis of 3D seismic exploration in coal mine. *Process in Geophysics* (in Chinese), 2005, 20(2): 377~380
- [6] 段铁梁. 中国煤田测井技术发展历程及前景展望. 中国煤田地质, 2003, 15(6): 65~67  
Duan T L. Course and prospect of China coalfield well logging technology. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2003, 15(6): 65~67
- [7] 葛祥, 李涛. 煤层物性测井评价方法初探. 测井技术, 2003, 27(2): 129~131  
Ge X, Li T. On well logging evaluation method for the physical property of coalbed. *WLT* (in Chinese), 2003, 27(2): 129~131
- [8] 余宝柱. 煤矿地质与测量. 北京: 煤炭工业出版社, 1992  
Yu B Z. Mine Geology and Measurement (in Chinese). Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992
- [9] W. H. 弗特尔, 沈志成. 根据测井资料预测含水量. 测井技术, 1980, 1: 19~24  
Fu Teer W H, Shen Z C. Water content prediction according to well logging data. *Well Logging Technology* (in Chinese), 1980, 1: 19~24
- [10] 罗娜. 阿尔奇公式数值分析及其意义. 石油学报, 2007, 28(1): 111~114  
Luo N. Numerical analysis of Archie formulae and its meaning. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 2007, 28(1): 111~114
- [11] 张振城, 孙建孟, 马建海等. 阿尔奇公式中  $a$ ,  $m$  值对饱和度计算结果的影响. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 27~34  
Zhang Z W, Sun J M, Ma J H, et. al. Effect of different values of  $a$  and  $m$  in Archie formula on water saturation. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 2004, 28(6): 27~34
- [12] 张喜, 乔向阳, 王玉艳等. 神经网络多属性分析技术. 油气田地面工程, 2007, 26(8): 1~3  
Zhang X, Qiao X Y, Wang Y M, et. al. Neural network multi-attribute analysis technology. *Oilfield Surface Engineering* (in Chinese), 2007, 26(8): 1~3
- [13] 侯俊胜, 王颖. 神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用. 地质与勘探, 1999, 35(3): 41~44  
Hou J S, Wang Y. Interpretation of well logging data for coalbed methane using neural network. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 1999, 35(3): 41~44
- [14] 赵发展, 王赞, 王界益等. 准噶尔和塔里木盆地不同岩性岩电参数研究. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1258~1265  
Zhao F Z, Wang Y, Wang J Y, et. al. Rock-electro parameters variant lithologic characters in Junggar and Tarim basin. *Process of Geophysics* (in Chinese), 2006, 21(4): 1258~1265
- [15] 朱广生. 地震双波速法预测孔隙度. 江汉石油学院学报, 1992, 14(1): 27~32  
Zhu G S. Use of P-wave and S-wave in porosity prediction with seismic data. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute* (in Chinese), 1992, 14(1): 27~32
- [16] Stewart R R. Joint P and P-SV inversion. *CREWES Project Research Report*. 1990, 2: 112~115
- [17] Vestrum R W, Stewart R R. Joint P and P-SV inversion: Application and testing. *CREWES Research Report*. 1993, 13

(本文编辑 汪海英)