

文章编号: 1008-2336 (2024) 04-0071-06

## 基于测井资料评价煤层气井产水

王冬冬<sup>1</sup>, 郇志浩<sup>2</sup>, 刘世伟<sup>1</sup>, 王文文<sup>3</sup>, 石磊<sup>1</sup>, 肖凌毅<sup>1</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 新疆库尔勒 841000; 2. 新汶矿业集团地质勘探有限责任公司, 山东新泰 271200; 3. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016)

**摘要:** 在煤层气开发过程中, 产气量往往受产水量影响, 多数高产水的井产能较低。产水量控制压降波及范围和甲烷解吸面积的大小, 从而决定单井气产量高低和稳产期长短, 因此准确地预测产水量就显得至关重要。根据排采过程中日产水量变化情况以及曲线形态分析, 将研究区日产水量曲线分为单峰衰减型、稳产型和多峰型。不同产水类型的煤层具有不同的测井响应特征和顶底板封隔性。基于反映产水类型的关键测井参数以及顶底板封隔性的泥质含量, 建立 Fisher 判别方程来确定产水类型。在测井资料与动态产水资料的综合研究基础上, 建立不同产水类型的产水量计算方法, 利用该方法计算的煤层产水量与实际产水量的吻合率在 80% 以上, 为今后煤层的勘探开发提供了一定的技术理论基础。

**关键词:** 煤层气; 测井资料; 单峰衰减型; 多峰型; 电阻率; 泥质含量; 产水量

中图分类号: P631.81

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2024.04.071

## Evaluation of Water Production in Coalbed Methane Wells Based on Logging Data

WANG Dongdong<sup>1</sup>, HUAN Zhihao<sup>2</sup>, LIU Shiwei<sup>1</sup>, WANG Wenwen<sup>3</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>, XIAO Lingyi<sup>1</sup>

(1. Well Tech-China Oilfield Services Limited, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. Xinwen Mining Group Geological Exploration Co., Ltd., Xintai, Shandong 271200, China; 3. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100016, China)

**Abstract:** In the process of coalbed methane (CBM) development, gas production is often affected by water production, and the productivity of most wells with high water production is low. The amount of water production determines the range of pressure drop and methane desorption area, which determines the level of gas production and the length of stable production period of a single well. Therefore, accurate prediction of water production is crucial. According to the change of water production in the drainage process and the analysis of curve morphology, the daily water production curve in the study area is divided into single peak attenuation type, stable production type, and multi-peak type. Coal seams with different water production types have different logging response characteristics and top-bottom sealing properties. Coal seams with different water production types have different logging response characteristics and sealing properties of roof and floor. Based on the key logging parameters which can reflect the water production type and the shale content of the top and bottom sealing property, Fisher discriminant equation is established to determine the water production type. Based on the comprehensive study of logging data and dynamic water production data, the calculation method of water production for different water production types is established. The coincidence rate between the calculated water production of coal seam and the actual water production is more than 80%, which provides a certain technical and theoretical basis for the exploration and development of coal seam in the future.

**Key words:** CBM; logging data; single peak attenuation type; multi-peak type; resistivity; shale content; water production

近年来, 天然气在我国能源使用中占据的比例越来越大, 市场的需求也在不断加大, 促使相关部门和学者进一步加大了对煤层气勘探技术的研究<sup>[1]</sup>。煤层气在成藏、赋存、运移方面不同于常规天然气<sup>[2]</sup>, 其储集机制要复杂得多<sup>[3]</sup>。煤层气是一种典型的解吸气, 在煤层气开采过程中, 主要通过排水使煤层气储层压力逐渐降低, 当其达到临界解吸压力以下时, 才会使

吸附在煤储层中的煤层气解吸出来<sup>[4]</sup>。在一定程度上, 采出水量决定了压降波及范围及甲烷解吸面积大小, 从而决定了单井产量高低和稳产期长短<sup>[5]</sup>。因此, 煤层气井产水量直接关系煤层气体的产出。故而准确地预测产水量就显得至关重要。

目前, 煤层气井预测和分析产水量方法主要采用数值模拟, 该方法在实际应用过程中相对复杂。笔者

收稿日期: 2024-03-07; 改回日期: 2024-05-23

第一作者简介: 王冬冬, 男, 1986年生, 本科, 工程师, 2009年毕业于东北石油大学资源勘查工程专业, 主要从事测井资料处理与解释工作。  
E-mail: wangdd5@cnoc.com.cn

基于测井资料,分析煤层的产水测井响应特征,在此基础上开展煤层产水量预测方法研究。通过对煤层的产水特征以及产水来源的分析研究,总结单峰衰减型、稳定型、多峰型煤层产水测井曲线(即电阻率、泥质含量)的特征。基于反映产水类型的关键测井参数以及顶底板封隔性的泥质含量,利用 Fisher 判别法确定产水类型,然后利用不同产水类型的产水规律估计产水量。在后期实际生产应用中,该方法在煤层预测产水量方面取得良好应用效果。

## 1 研究区基本概况

研究区构造位置处于鄂尔多斯盆地东缘的伊陕斜坡和晋西挠褶带上<sup>[6]</sup>(图1)。研究区煤层具有“埋深大,高温、高压条件,煤阶范围广”的特点<sup>[7]</sup>,主力煤层8号和9号位于本溪组,煤层整体厚度较大,且区域稳定分布,埋藏深度在2000m左右,吨煤含气量在10~35 m<sup>3</sup>/t,整体煤层品质较好。通过近几年的勘探,该区致密砂岩气取得了很好的勘探成果,但是对煤层气相关研究相对较少<sup>[8]</sup>。随着勘探程度的增加,亟需对煤层进行精细研究,特别是对煤储层产气量关键影响因素产水量的研究。

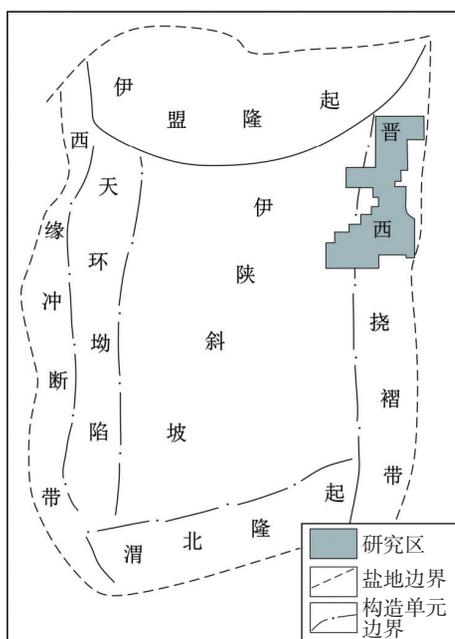


图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Structural location map of the study area

## 2 煤层产水评价方法

煤层产水地质因素复杂。测井资料能够反映煤系地层的岩性,提供煤层及顶底板的厚度、泥质含量

等资料,评价顶底板砂岩层的含水性 and 封盖性,形成了煤层产水预测的基础<sup>[9]</sup>。通过研究产水来源以及产水类型,来确定不同产水类型的测井响应特征以及顶底板的封闭性影响参数,从而对煤层产水量进行综合评价。

### 2.1 煤储层产水来源

煤层气主要以吸附气形式存在于煤储层孔隙、割理和外生裂隙中<sup>[10]</sup>。在煤层气开采过程中,通过对煤层排水降压,促使甲烷等吸附性气体大量解吸并形成连续的气体渗流通道。排水降压过程的有效性主要受到煤储层及顶底板的含水性、密封性和是否有远端供水源的影响。含水层与煤储层水动力联系较强时,煤储层的供液能力增强,排采难度增大<sup>[11]</sup>。长期排水,难以获得高产。煤层出水量关系到煤层气井的产能大小,而查明煤层气井产水源则是预测出水量的关键。煤储层产水主要有煤储层水、煤层顶底板含水以及远端水三个来源,并且都有各自典型的产水特征。

煤储层水是填充在煤储层割理中的可流动的水,是煤储层产水的最直接原因。其特征为煤储层保存完整且有一定厚度,其顶底板无较厚的含水层且密封性较好。这种情况下排采过程中产水曲线特征主要表现为具有明显的排水期,排水期后产水量明显减小且趋于稳定,部分井日产水量甚至能达到1 m<sup>3</sup>/d以下。煤层顶底板含水性对煤层气井产水有较大的影响<sup>[12]</sup>,是煤储层排采重要水源之一,也是造成煤储层排水过程困难的主要原因之一。当煤储层顶底板存在较厚的含水砂岩层,且中间无泥岩封隔或泥岩存在裂缝或者压裂过程压穿了封隔层时,顶底板中的水就会窜到煤储层中。这种情况下排水期往往呈现出极高的日产水量且持续时间很长,以致无法达到降压排采的目的,煤储层的产气量往往较低。而远端水特征为煤储层顶底板砂岩不发育且密封性较好,但是压裂后产水异常高。远端水属于外源动水,具有较好的补给条件,是造成产水量异常大的原因之一<sup>[13]</sup>。

### 2.2 煤储层产水类型

煤层气井的产水曲线形态是煤储层资源潜力高低、围岩补给水多少、排采工作制度合理与否的综合反映<sup>[14]</sup>。根据排采过程中日产水量变化情况,从曲线形态上分析,将研究区日产水量曲线分为单峰衰减型、稳定型和多峰型。其中单峰衰减型从曲线形态可较明显地划分为两个阶段,即排水期和稳产期(图2a)。排水期日产水量曲线呈现明显的单峰态,峰值较高可达12 m<sup>3</sup>/d,持续时间多为1年,有的较长为2年;之后日产水量逐渐减小,进入稳产期,此时日产水量

平均值多在  $2 \text{ m}^3/\text{d}$  以内, 多贯穿整个煤储层排采过程。稳产型产水量曲线呈现稳定峰的形态, 也具有排水期与稳产期, 排水期产水曲线稳定, 峰值持续时间较长; 排水期后日产水量突然下降, 稳产期时曲线形态整体较平稳 (图 2b)。稳产型一般是由施工原因造成 (数十天仅记录一次测量结果), 非自然产生。多峰型产水量曲线呈现多峰形态, 或者稳产期出现日产水量突变式的增大, 没有明显的排水期与稳产水期, 产水量在一定范围内波动, 整体表现为水排不尽的特征 (图 2c)。

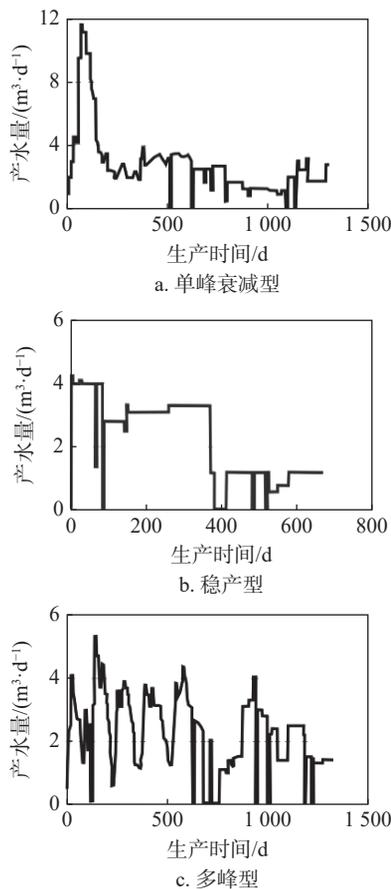


图 2 研究区典型产水曲线形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of typical water production curves in the study area

稳产型产水量受到人为因素干扰较大, 因此仅研究单峰衰减型和多峰型。结合测井资料以及储层参数确定不同产水类型的水来源, 为后期的估算产水量打下基础。首先单峰衰减型井产水量与储层电阻率 RD 呈负相关关系, 随着储层电阻率的增大, 产水量减小 (图 3)。由于煤储层含水率影响到储层 RD 值, 电阻率与产水量的负相关关系, 为单峰衰减型井产水来源为储层水提供了有利的证据。

其次多峰型井产水量与储层电阻率 RD 具有负相关的变化趋势, 然而相关度并不好, 个别高电阻率 RD 和高产水量的井分布在整体趋势线之外 (图 4)。

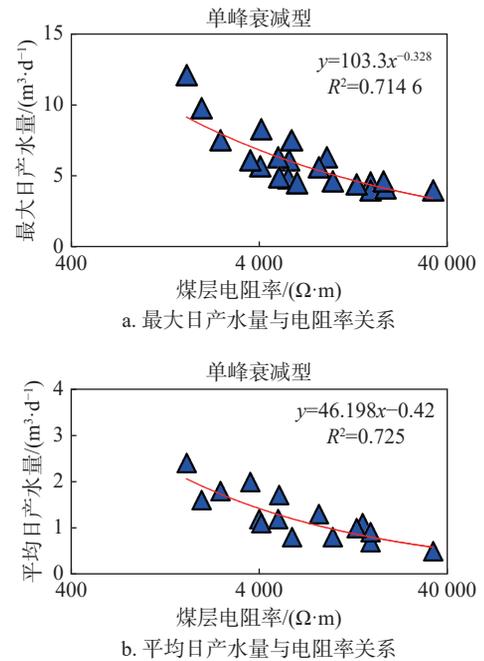


图 3 单峰衰减型井的产水量与储层 RD 的关系

Fig. 3 The relationship between the water production of a single-peak attenuated well and the RD of the reservoirs

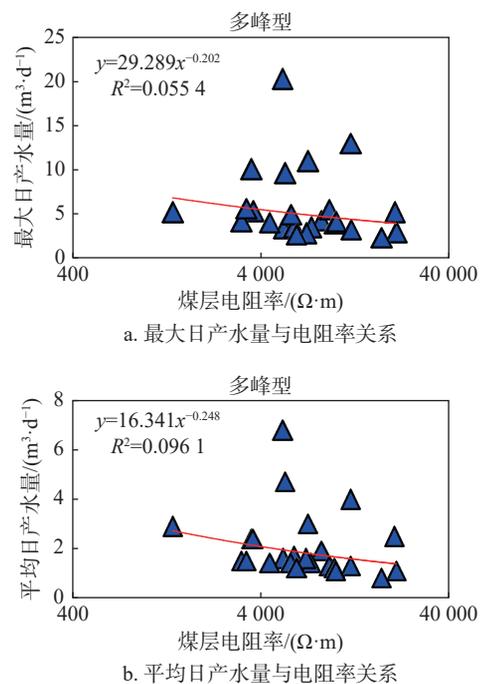


图 4 多峰型井的产水量与储层 RD 的关系

Fig. 4 The relationship between the water production of a multi-peak wells and the RD of the reservoirs

这说明多峰型井产水量可能受到顶底板水或远端水的影响。

同时考虑到煤层顶底板封隔性对煤层层产水可能存在的影响, 基于老顶板、老底板泥质含量与产水量绘制了交会图。单峰衰减型井产水量和顶底板泥质含量相关性很差或没有相关性, 受泥质含量影响较小, 产水主要来自煤层内部水 (图 5)。

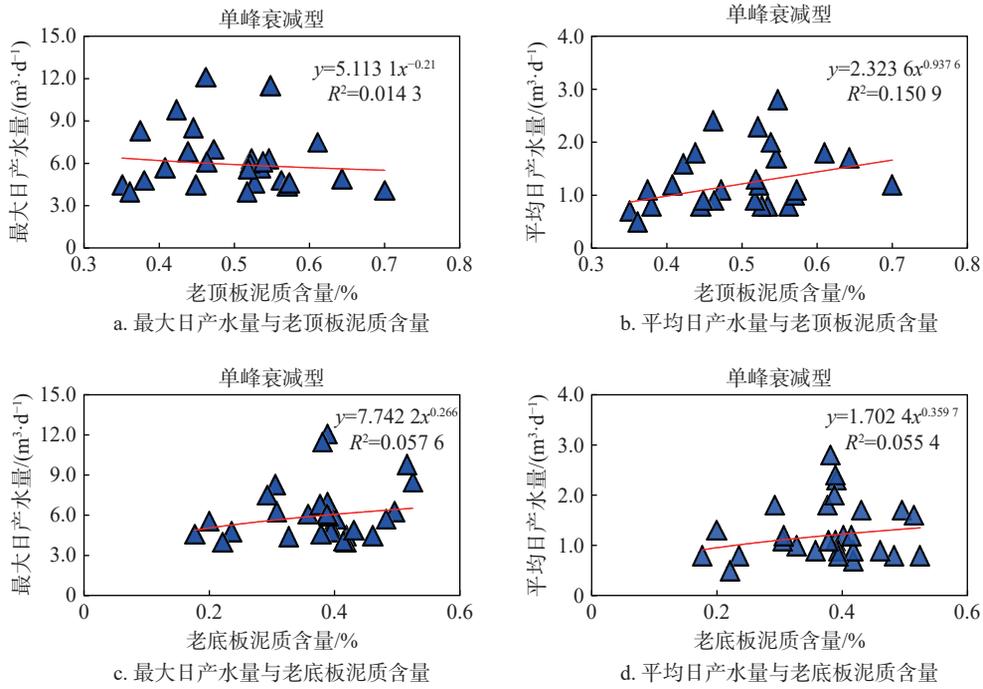


图 5 单峰衰减型井的产水量与老顶、底板泥质含量的关系

Fig. 5 The relationship between the water production of single-peak attenuation wells and the shale content of old roof and floor

而多峰型井产水量随老顶板泥质含量的增加而减少 (图 6)。当老顶板泥质含量低时, 煤层产水量增大, 说明煤层顶板的封隔性变差, 导致远端水通过顶板通道而来或者煤层老顶板含水, 导致顶板水供给煤

层。而底板泥质含量与产水量相关性较差, 说明研究区多峰型产水底板整体封隔性较好, 受泥质含量影响较小, 产水量主要受顶板封隔性的影响, 水源来自于顶板或者远端水通过顶板通道而来 (图 6)。

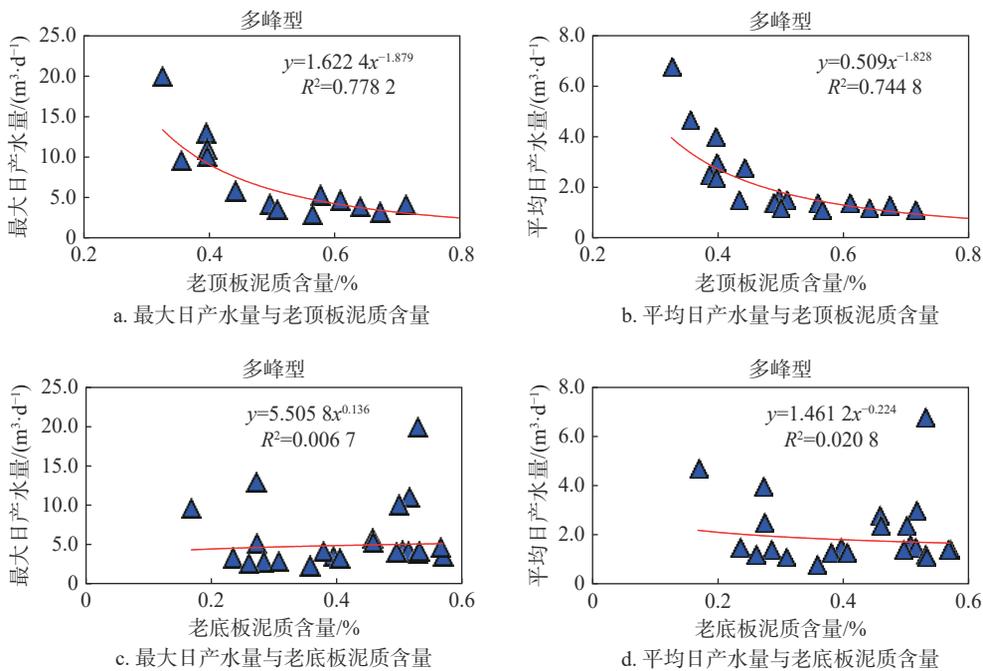


图 6 多峰型井的产水量与老顶、底板泥质含量的关系

Fig. 6 The relationship between the water production of multi-peak wells and the shale content of old roof and floor

### 2.3 煤储层产水评价方法

不同产水类型的煤层存在不同的测井响应特征和封隔性。基于反映产水类型的关键测井参数以及顶底板封隔性的泥质含量等数据进行建模, 建立了产水量

评价模型。由于稳产型井的产水数据受人为因素影响大, 因此下面的建模不使用稳产型的井, 仅对单峰衰减型和多峰型的井进行建模分析。

Fisher 判别分析法是根据观测到的样本的若干数

量特征, 对新获得的样本进行归类、识别, 判断其所属类型的一种多元统计分析方法<sup>[15]</sup>。利用 Fisher 判别法确定产水类型, 然后利用不同产水类型的产水规律估计产水量。Fisher 判别法选取的参数包括地质背景 (海拔、埋深、储层压力)、煤储层参数 (储层 RD) 和顶板参数 (顶板密封性指数)。计算的 Fisher 分类函数系数见表 1。

表 1 产水类型的分类函数系数

Table 1 Classification function coefficient of water production types

系数项	分类系数	
	单峰衰减型	多峰型
<i>a</i>	0.157 010 165	0.166 436 954
<i>b</i>	0.083 142 095	0.090 304 068
<i>c</i>	4.729 695 022	3.242 494 751
<i>d</i>	0.000 315 517	0.000 303 540
<i>e</i>	0.755 541 338	0.688 756 613
<i>f</i>	-67.463 086 6	-70.127 772 71

基于表 1 可以建立两个分类函数, 公式见式 (1)。实际分类时把每口井带入这两个函数, 不同的产水类型对应不同的系数, 因此能够计算出代表单峰衰减型的  $Q_1$  和代表多峰型的  $Q_2$ , 若  $Q_1$  大于  $Q_2$ , 代表该井为单峰衰减型, 反之则为多峰型。

$$Q = a \times H + b \times D + c \times P_{\text{储层}} + d \times RD_{\text{煤层}} + e \times I_{\text{顶板}} + f \quad (1)$$

式中:  $Q$  为分类函数计算结果;  $H$  为煤储层海拔, m;  $D$  为煤储层垂深, m;  $P_{\text{储层}}$  为储层压力, MPa;  $RD_{\text{煤层}}$  为煤储层深侧向电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $I_{\text{顶板}}$  为顶板密封性指数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  值见表 1。

其中, 顶板密封性指数 ( $I_{\text{顶板}}$ ) 的计算公式如下:

$$I_{\text{顶板}} = T_{\text{老顶}} \times V_{\text{SH老顶}} + T_{\text{直顶}} \times V_{\text{SH直顶}} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{老顶}}$  代表老顶板厚度, m;  $V_{\text{SH老顶}}$  代表老顶板泥质含量, %;  $V_{\text{SH直顶}}$  代表直接顶板泥质含量, %。

利用 Fisher 分类后, 利用测井曲线 RD 与老顶板泥质含量分别对单峰衰减型与多峰型井的产水量进行估计, 单峰衰减型井产水量预测公式如下:

$$W_m = 103.3 \times RD_{\text{煤层}}^{-0.328} \quad (3)$$

$$W_a = 46.198 \times RD_{\text{煤层}}^{-0.42} \quad (4)$$

多峰型井产水量预测公式如下:

$$W_m = 1.6224 \times V_{\text{SH老顶板}}^{-1.879} \quad (5)$$

$$W_a = 0.509 \times V_{\text{SH老顶板}}^{-1.828} \quad (6)$$

式中:  $W_m$  为日最大产水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $W_a$  为日平均产水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $RD_{\text{煤层}}$  为煤储层深侧向电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $V_{\text{SH老顶板}}$  为老顶板泥质含量, %。

### 2.4 应用效果评价

根据上述预测煤层产水量公式对 A 井进行产水量的预估。首先将 A 井相关参数带入式 (1) 中, 计算出来  $Q_1 < Q_2$ , 产水类型为多峰型, 与后期排采曲线形态相一致 (图 7)。

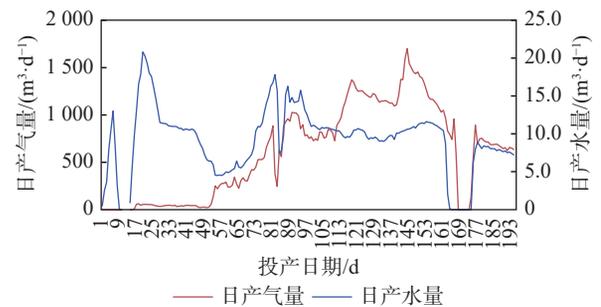


图 7 A 井排采数据曲线图

Fig. 7 Well A drainage and production data curve

根据多峰型井产水量预测公式计算 A 井产水量。产水预测公式计算的平均日产水量为  $7.2 \text{ m}^3$ , 最大日产水量为  $20.39 \text{ m}^3$ 。根据 A 井 2016 年 12 月 25 日至 2017 年 7 月 6 日的排采数据, 平均日产水量  $8.60 \text{ m}^3$ , 最大日产水量  $19.36 \text{ m}^3$ , 其中预测平均日产水量与实际平均日产水量的误差在 11.7% 左右, 预测最大日产水量与实际最大日产水量的误差在 4.9% 左右。从 A 井产水量的预测误差来看, 该方法计算的煤层产水量与实际产水量的吻合率基本在 80% 以上, 验证了该方法的有效性 (图 8)。

## 3 结论与认识

(1) 测井资料能够反映煤系地层的岩性, 提供煤层及顶底板层的厚度、泥质含量以及顶底板封隔性等情况, 形成了煤层产水预测的基础。

(2) 通过不同产水类型的不同测井响应特征分析, 单峰衰减型主要受到储层电阻率影响, 与顶底板的泥质含量关系不大, 水主要来源于煤层内部。多峰型产水量与电阻率相关性较差, 与顶板泥质含量相关性好, 产水量随着顶板泥质含量的增高而降低, 水源来自顶板或者远端水通过顶板通道而来。

(3) 不同产水类型的煤层存在不同的测井响应特征。基于影响煤层产水类型的电阻率以及泥质含量, 建立 Fisher 判别方程来确定产水类型, 然后利用不同产水类型的产水规律估计产水量, 为今后煤层的勘探开发奠定了技术基础。

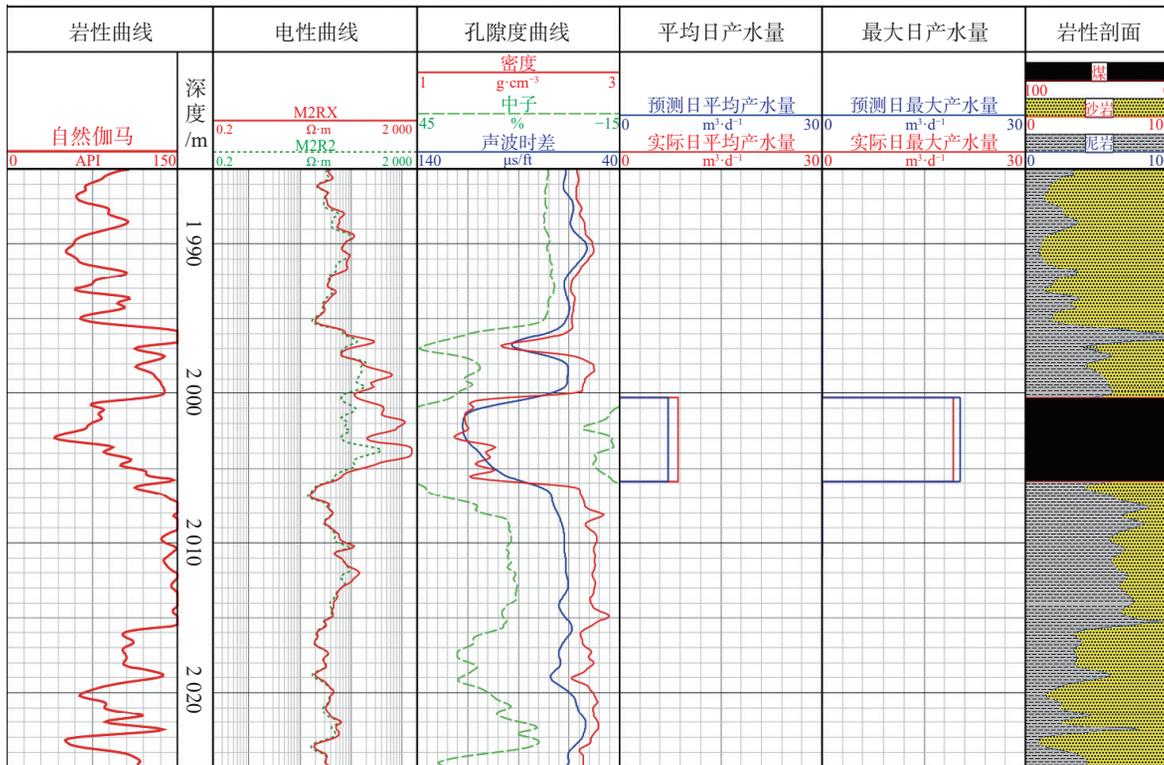


图 8 A 井产水预测处理成果

Fig. 8 Well A water prediction processing results

参考文献：

[1] 何晓辉. 煤层气测井解释方法研究与应用 [D]. 武汉: 长江大学, 2012.

[2] 李明忠, 陈会娟, 陈文徽, 等. 无因次产水图版预测煤层气井产水量研究 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34 (8): 139-142.

[3] 陶树, 汤达祯, 许浩, 等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发建议 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (2): 194-198.

[4] 倪小威, 刘迪仁, 艾林, 等. 基于 BP 神经网络算法的测井资料煤层气储层产水预测 [J]. 煤炭技术, 2017, 36 (9): 105-107.

[5] 贾慧敏, 孙世轩, 毛崇昊, 等. 基于煤岩应力敏感性的煤层气井单相流产水规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45 (12): 189-193.

[6] 刘闯. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界煤系气共生组合模式 [J]. 复杂油气藏, 2022, 15 (2): 1-7.

[7] 高丽军, 谢英刚, 潘新志, 等. 临兴深部煤层气含气性及开发地质模式分析 [J]. 煤炭学报, 2018, 43 (6): 1634-1640.

[8] 成家杰, 王文文, 侯振学, 等. 常规测井资料在致密砂岩储层产能评价中的应用 [J]. 测井技术, 2017, 41 (3): 325-330.

[9] 王建功, 陈晓琼, 冯志勇, 等. 煤层产水因素测井分析//叶建平, 傅小康, 李五忠. 2013 年煤层气学术研讨会论文集 [M]. 北京: 地质出版社, 2013: 240-246.

[10] 易俊. 声震法提高煤层气抽采率的机理及技术原理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

[11] 刘之的, 赵靖舟, 徐凤银, 等. 煤层气井排采水源分析及出水量预测——以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例 [J]. 天然气工业, 2014, 34 (8): 61-67.

[12] 刘广景. 煤层气高产水井原因分析及水源识别——以沁水盆地柿庄南区块 3 号煤井为例 [J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46 (3): 123-130.

[13] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 基于生产特征曲线的煤层气合采干扰判别方法——以黔西地区织金区块为例 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49 (5): 977-986.

[14] 冯绪兴, 倪小明, 郝少伟, 等. 常村煤矿煤层气井产水/产气曲线类型及其成因分析 [J]. 中国矿业, 2021, 30 (1): 106-113.

[15] 付玉华, 董陇军. 基于 Fisher 判别的煤层底板突水量预测研究 [J]. 矿业研究与开发, 2009, 29 (3): 70-72.