

doi:10.3799/dqkx.2016.148

小波分析在致密砂岩气层识别中的应用

石玉江¹, 潘保芝², 蒋必辞^{2,3*}, 张海涛¹, 杨小明¹, 郭宇航², 刘丹²

1. 中石油长庆油田勘探开发研究院, 陕西西安 710049
2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026
3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西西安 710054

摘要: 致密砂岩储层孔隙度低、渗透率低、非均质性强, 气层所对应的测井响应特征较为复杂, 气层识别和评价难度较大, 多解性突出. 以三水模型、岩心、地质和试气资料为基础, 采用能量谱峰值与能量加权累计法定量分析致密砂岩气层的电阻率与自由流体孔隙度组合曲线的小波多尺度能谱特征, 以及小波包能量谱特征. 组合曲线的多尺度小波能量谱分析方法在致密砂岩气层识别中气层的能量谱与水层的能量谱明显不同, 并用其识别苏里格地区的致密砂岩气层. 结果表明识别致密砂岩气层能量加权累计法定量分析比小波能量峰分析效果更好.

关键词: 三水模型; 小波包分析; 小波多尺度分析; 滑动窗分析; 致密砂岩; 苏里格地区; 能量加权累计; 地球物理.

中图分类号: P631 **文章编号:** 1000-2383(2016)12-2127-09 **收稿日期:** 2016-01-13

Application of Wavelet Analysis in Identification of Tight Sandstone Gas Reservoirs

Shi Yujiang¹, Pan Baozhi², Jiang Bici^{2,3*}, Zhang Haitao¹, Yang Xiaoming¹, Guo Yuhang², Liu Dan²

1. Research Institute of Exploration and Development, Petro Changqing Oilfield Company, Petro China, Xi'an 710049, China
2. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
3. Xi'an Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710054, China

Abstract: With the characteristics such as low porosity, low permeability, strong heterogeneity, tight sandstone, and complex logging response of tight sandstone reservoirs, the gas identification and evaluation are difficult with multiple solutions. The peak energy and a weighted cumulative quantitative are applied in the paper to analyze features of multi-scale wavelet and wavelet packet analysis based on three-water model, cores, geological and gas test data in tight sandstone gas reservoirs. Then the appropriate method of multi-scale wavelet energy spectrum of tight sandstone gas reservoirs is selected to identify tight sandstone gas in Sulige region, which achieved good effect.

Key words: three-water model; wavelet packet analysis; multi-scale wavelet analysis; sliding window analysis; tight sandstone; Sulige area; energy-weighted cumulative; geophysics.

0 引言

苏里格气田上古生界属于复杂的低渗透致密砂岩气藏, 高低阻气层和高阻水层并存, 增加了测井气层识别的难度; 储层孔隙类型多样、孔隙结构变化大、非均质性强, 导致测井响应关系复杂, 储层的气

层识别难度大(李霞等, 2013).

目前致密砂岩气层识别的方法多种多样, 定性识别方法主要利用储层中的天然气对 neutron、声波、密度等测井曲线的影响, 利用曲线重叠法来识别气层; 半定量方法主要为各种交会图法, 但是曲线重叠法和交会图法的漏判率高, 受泥质含量影响较大; 定量

基金项目: “十二五”重大专项(Nos. 2011ZX05044, 2011ZX05040-002).

作者简介: 石玉江(1971-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事测井地质综合研究及测井新技术应用工作. E-mail: syj_cq@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 蒋必辞, E-mail: jiangbici@cctegxian.com

引用格式: 石玉江, 潘保芝, 蒋必辞, 等, 2016. 小波分析在致密砂岩气层识别中的应用. 地球科学, 41(12): 2127-2135.

方法有多种:纵波时差差比法、视流体识别指标法、地层含气指标法、等效弹性模量差比法、天然气标志法和纵横波速度比法。前 3 种方法在致密砂岩气层识别中挖掘效应不明显时效果不明显;后 3 种方法是基于阵列声波测井,在中高孔渗砂岩中有较好的应用,但是在致密砂岩中应用时有一定的不适应性(李霞等,2013);智能识别方法有模糊模式识别法、神经网络、灰色模式识别法、遗传算法等(李云省等,2003),智能识别法识别气层,需要进行大量的样本训练,并且具有区域性。因此对于致密砂岩气层的识别需要应用新的数学手段,小波分析在常规储层、碳酸盐岩储层、砂砾岩储层、低阻储层的油水层识别中已经有了很好的应用(岳文正和陶果,2004; Enrique *et al.*, 2006; 王鑫等,2010; 张莹等,2012),但是在致密砂岩气层识别中却没有应用。Enrique *et al.* (2006)运用感应电阻率曲线的多尺度小波分析系数分布特征识别砂泥岩和碳酸盐岩储层流体;王鑫等(2010)运用电阻率曲线小波能谱峰值特征识别砂砾岩储层油水层;张莹等(2012)运用对比多分辨率(也即多尺度)小波能谱和小波包能谱分析在低阻储层油水识别中能谱主峰的差异,并且认为在低阻储层油水识别中小波包能谱分析效果更好。致密砂岩储层孔隙类型复杂,孔隙结构变化大,气层的测井响应关系复杂,因此应该对常规测井曲线进行小波分析,减小储层骨架、孔隙的影响,突出测井曲线的流体信息,便于致密砂岩气层识别。

本文将多尺度小波能量谱分析、小波包能量谱分析两种方法应用于致密砂岩的气层识别中,利用三水模型计算的自由流体孔隙度 φ_f ,重构含流体敏感信息 $Rt \times \varphi_f^2$,作为分析对象,笔者在前人小波分析能谱峰值法识别流体的基础上,提出小波分析能量谱的加权累加法,不仅可以展示能量的峰值位置,还可以定量展现能量谱的整体变化特征。根据处理结果,分析两种方法在致密砂岩气层识别中的适用性。选择适合致密砂岩气层识别的小波多尺度能量谱分析方法,将滑动窗分析法应用于苏里格地区多口井中,识别苏里格地区致密砂岩气层。

1 基本原理

从信号能量构成角度出发,测井信号的总能量应是地层微观孔隙及其所含流体与宏观岩性岩相等各种信号能量之和。利用小波变换方法对测井信号进行细致分析,把对流体性质反映较为敏感的原始

测井信号分解成不同频带的多个成分,高频部分对应于微观孔隙及其所含流体的性质,低频部分则反映地层岩性及岩相的变化。根据 Parseval 定理,小波变换后的能量与原始信号的能量之间存在等价关系,因此用小波能量谱来表示原始信号的能量分析是可靠的。

分析储层流体的小波能量谱特征,在利用多尺度小波和小波包分析将高频与低频分离出来的同时,需要去掉微观孔隙结构对高频能量的影响,依据阿尔奇公式的原理,选择对流体敏感的电阻率 Rt 与孔隙度 φ 的乘积 $Rt \times \varphi^2$ 来分析。孔隙度 φ 为使用计算精度高的三水模型(张丽华等,2010; 石玉江等,2012; 谷穗等,2015)得到的自由流体孔隙度,三水模型在苏里格气田储层评价中已取得较好的应用(石玉江等,2012)。人们在三水模型中将地层孔隙度分为粘土水孔隙度、微孔隙度、自由流体孔隙度,并且认为烃只能进入自由流体孔隙中,笔者为突出致密砂岩气层的特征,故选择三水模型中的自由流体孔隙度 φ_f 。

1.1 三水模型中自由流体孔隙度的计算

在致密砂岩的孔隙中存在着微毛细水、粘土水和可以自由流动的自由水。在三水模型中,笔者充分考虑了其各自的流动特征,认为自由水和微毛细水具有相同的导电性,即电阻率相同,而粘土水的导电特征比较独特,将其与自由水和微毛细水分开来考虑,以评价储层的含气性(张丽华等,2010),其岩石体积模型见图 1。

(1)总孔隙度 φ_t 的计算。通常用密度孔隙度(φ_D)和中子孔隙度(φ_N)来计算岩石孔隙度,然后采用求取平均值的方法来确定储层岩石的总孔隙度 φ_t ,具体公式如下:

$$\varphi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}, \quad (1)$$

$$\varphi_N = \frac{\varphi - \varphi_{Nma}}{\varphi_{Nf} - \varphi_{Nma}}, \quad (2)$$

$$\varphi_t = \sqrt{\frac{\varphi_D^2 + \varphi_N^2}{2}}, \quad (3)$$

式中: ρ_{ma} 、 φ_{Nma} 分别为砂岩骨架的密度、中子值; ρ_f 、

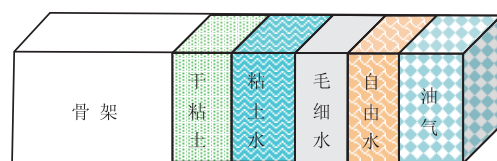


图 1 致密含气砂岩岩石体积模型

Fig. 1 The rock volume model of tight gas sandstone

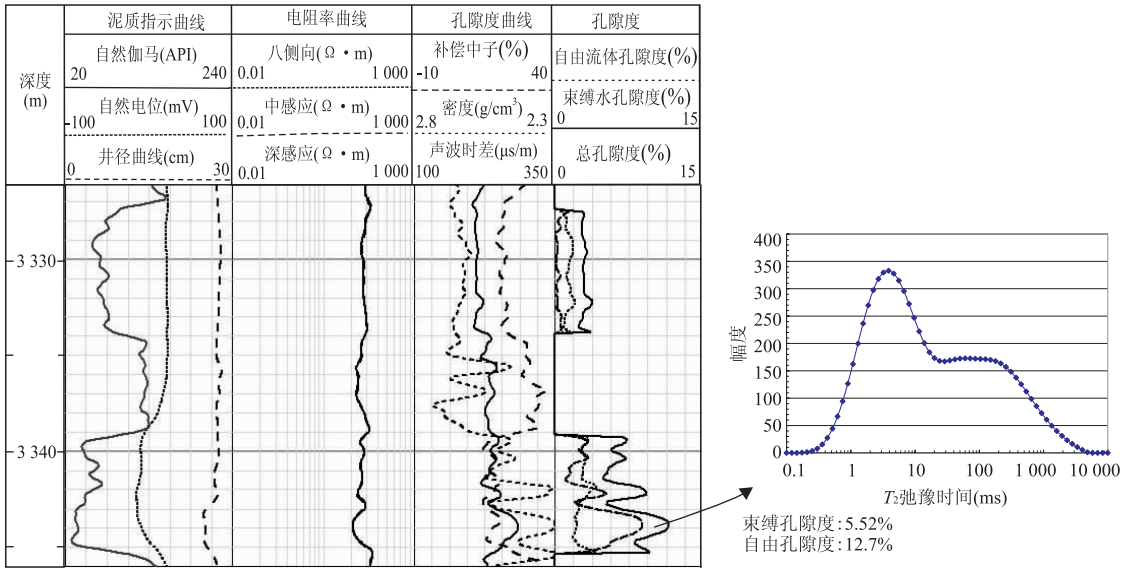


图 2 X69 井三水处理孔隙度与岩心核磁孔隙度对比

Fig. 2 The comparison of three-water porosity and core NMR porosity in X69 well

ρ_{nf} 分别为孔隙流体的密度、中子值; ρ_b 、 φ 分别为密度、中子测井值。

(2) 粘土水孔隙度 φ_{cl} 的计算. 三水模型中计算湿粘土的密度孔隙度值 φ_{cl} , 就是将干粘土作为骨架, 而粘土束缚水就作为孔隙, 因此, φ_{cl} 为:

$$\varphi_{cl} = \frac{\rho_{cl} - \rho_{del}}{\rho_{cw} - \rho_{del}}, \quad (4)$$

$$\varphi_{cw} = V_{cl} \varphi_{cl}, \quad (5)$$

式中: ρ_{del} 、 ρ_{cl} 、 ρ_{cw} 分别为干粘土、湿粘土和粘土水的密度; V_{cl} 为粘土含量。

(3) 微毛细水孔隙度 φ_i . 束缚水孔隙度即岩石整体中束缚水所占的百分含量:

$$\varphi_{BW} = S_{wb} \cdot \varphi_t. \quad (6)$$

而束缚水是由微毛细水和粘土水组成, 因此:

$$\varphi_i = \varphi_{BW} - \varphi_{cw}. \quad (7)$$

(4) 自由流体孔隙度 φ_f . 自由流体孔隙度可由总孔隙度减去束缚水孔隙度得到:

$$\varphi_f = \varphi_t - \varphi_{BW}. \quad (8)$$

图 2 为苏里格地区 X69 井三水模型计算的 3 种孔隙度值与核磁实验得到孔隙度的对比结果. 根据笔者在 X69 井 3 341.99 m 处提取的岩心可动流体实验报告可以看到, φ_{BW} 为 5.52%、 φ_f 为 12.7%, 而三水模型处理的结果中 φ_{BW} 为 4.98%、 φ_f 为 12.87%, 可以看到其计算精确度很高。

1.2 小波能量谱分析

对于小波多尺度分析和小波包分析的原理(周伟等, 2010) 本文不再进行赘述, 本文主要叙述小波

能量谱和小波能量加权累计谱。

在多尺度小波分析和小波包分析中, 某尺度下信号的能量 E_j 为该尺度小波系数的平方和, 定义为:

$$E_j = \sum_{k=1}^N |D_j(k)|^2, j = 1, 2, \dots, J, \quad (9)$$

式中: E_j 某尺度下信号的能量, 标量; N 为信号长度; $D_j(k)$ ($k=1, 2, \dots, N$) 为 j 尺度下的小波系数; J 为信号分解尺度, 标量。

本文利用小波能量谱分析识别储层流体, 多尺度小波分析提取各层高频段的能量组成能量谱. 小波包分析提取分解各层的高频段能量之和组成的能量谱, 以三尺度分析(图 3) 为例, 多尺度小波能量谱为:

$$E_{多尺度} = [E_1, E_2, E_3] = [E_{cD1}, E_{cD2}, E_{cD3}], \quad (10)$$

三尺度小波包分析(图 4) 能量谱为:

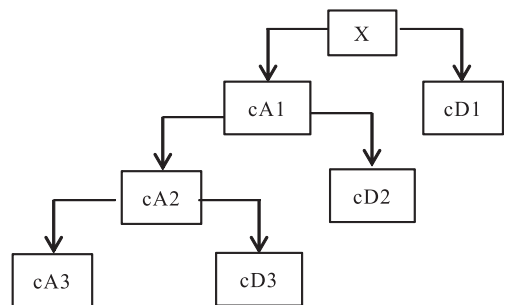


图 3 三尺度离散小波分析树结构

Fig. 3 Discrete wavelet analysis tree structure in three scale

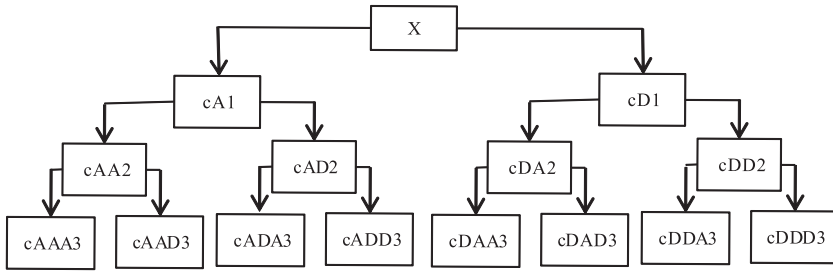


图 4 三尺度小波包分析树结构

Fig. 4 Wavelet packet analysis tree structure in three scale

$$E_{\text{小波包}} = [E_1, E_2, E_3] = [E_{cD1}, E_{cDA2} + E_{cDD2}, E_{cDAA3} + E_{cDAD3} + E_{cDDA3} + E_{cDDD3}]. \quad (11)$$

以分解尺度为横坐标,以小波能量谱为纵坐标,绘制能量谱图.寻找能量谱图上 2 个最大能量所对应的尺度值以及能量谱图的特征,进行流体识别分析.

为定量分析能量谱的特征,显示各个尺度上能量的分布情况,和整体能量分布情况,采用尺度对能量谱上各个尺度上的能量进行加权,然后进行累加,得到能量累计谱:

$$E_{\text{累计}} = [E_1, E_1 + 2 \times E_2, E_1 + 2 \times E_2 + 3 \times E_3]. \quad (12)$$

2 小波能谱分析识别致密砂岩气层

笔者整理苏里格地区致密砂岩储层的试气资料,选取气层(10 个)、水层(6 个)共计 16 个层段,对构造曲线 $Rt \times \varphi_t^2$ 进行小波能量谱分析(多尺度小波能量谱分析和小波包能量谱分析). Haar 函数因其本身具有良好的伸缩性、正交性且构造简单,在信号分解中具有良好的应用.本文选择 Haar 小波作为小波分析的基函数.

在分析处理之前,为小波能谱分析识别流体在整口井中进行滑动窗处理应用,根据苏里格地区的储层厚度平均值,选择的处理窗长需要满足纵向分辨率的精度,取 40 个采样点,也即所有的层段无论长短,采样点数均为 40,这样在滑动窗处理中,窗长也即为 $40 \times 0.125 \text{ m} = 5 \text{ m}$,滑动小波分析处理的效果也即以 5 m 厚的地层为研究对象,分析其组合曲线的小波能谱的特征,滑动分析处理的步长为 $1 \times 0.125 \text{ m}$ (注: 0.125 m 为测井采样间隔),滑动窗处理分析可以满足苏里格地区致密砂岩储层的纵向分辨率.

小波分析的尺度是信号能量分布情况的反映,选择的尺度必须能够将信号小波分析能量都包含,

表 1 小波能谱分析 2 个最大能量的尺度值统计

Table 1 The statistics of the two largest energy scale of the wavelet energy spectrum analysis

类型	层号	多尺度小波能谱		小波包能谱	
		第 1	第 2	第 1	第 2
气层	1	5	2	5	4
	2	4	3	4	5
	3	3	4	4	5
	4	5	2	5	4
	5	4	2	5	4
	6	5	3	5	4
	7	5	3	6	5
	8	5	2	5	4
	9	5	4	5	4
	10	5	3	5	4
水层	1	4	3	5	4
	2	5	4	5	4
	3	5	3	5	4
	4	4	2	5	4
	5	3	2	5	4
	6	4	5	5	4

并且跟信号的长度有关系,根据实际处理分析情况,尺度 J 为 10(也即 10 层分解)即可满足分析要求.

具体的处理过程如下:

(1)对目标层段的 $Rt \times \varphi_t^2$ 曲线进行重采样,采样点数为 40 个;

(2)对 $Rt \times \varphi_t^2$ 进行多尺度小波分析和小波包分析,并求取小波能谱 $E = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_J]$;

(3)作小波能量谱图,横坐标为分解尺度,纵坐标为小波能量谱;

(4)分析气层、水层的小波能量谱特征,寻找最大 2 个能量值的尺度值;

(5)求取小波能量加权累计谱:

$$E_{\text{累计}} = [E_1, E_1 + 2 \times E_2, E_1 + 2 \times E_2 + 3 \times E_3, \dots, E_1, E_1 + 2 \times E_2 + 3 \times E_3 + \dots + J \times E_J].$$

对选取的层段进行多尺度小波能量谱分析和小波包能量谱分析,选择 MATLAB 平台实现分析,分析的结果如表 1:

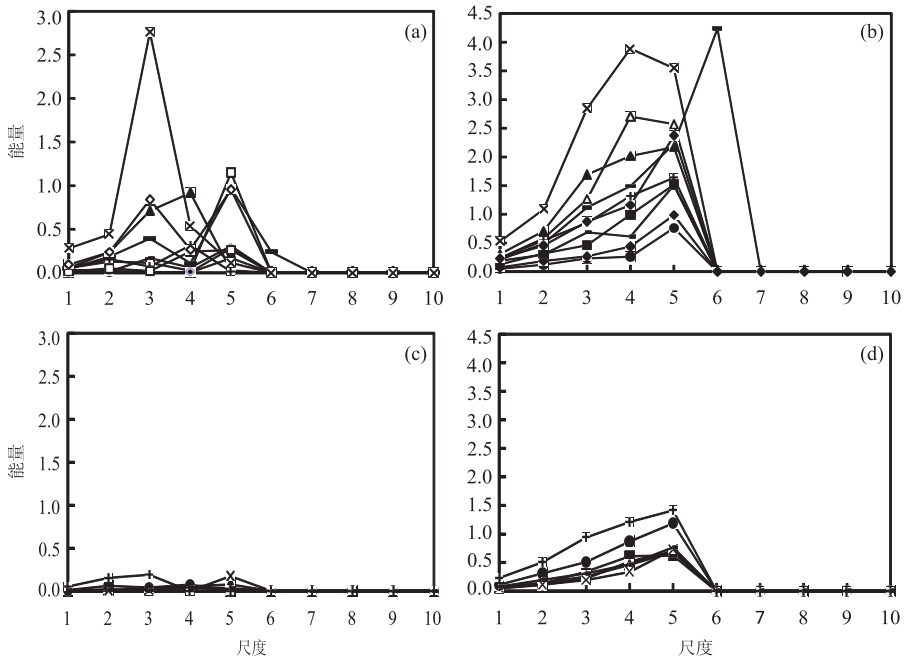


图 5 气层段(a,b)和水层段(c,d)能量谱

Fig. 5 The energy spectrum of gas layers (a,b) and water layers (c,d)

a,c. 多尺度分析; b,d. 小波包分析

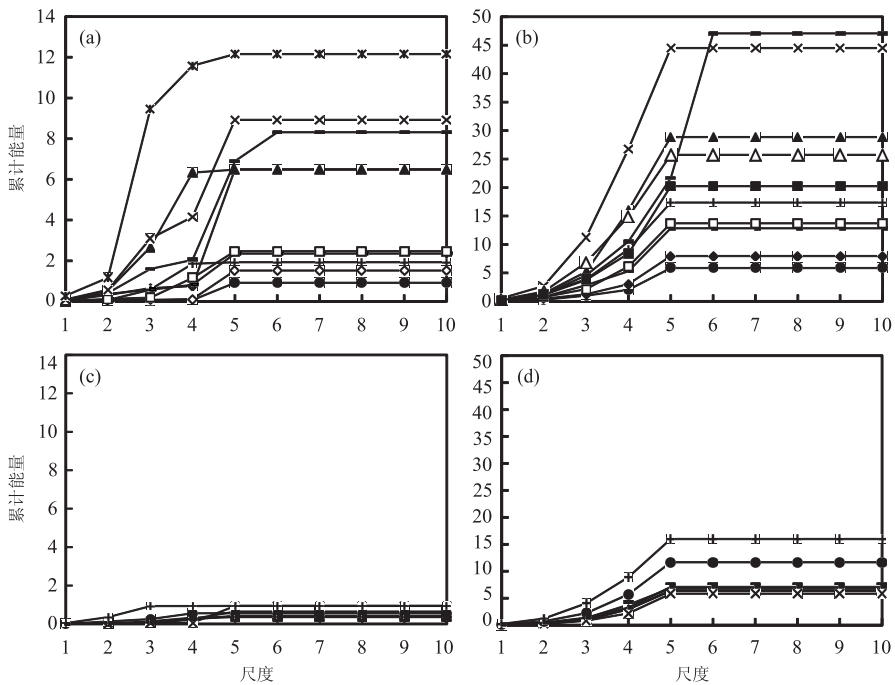


图 6 10 个气层段(a,b)和 6 个水层段(c,d)能量加权累计谱

Fig. 6 The energy weighted cumulative spectrum of ten gas layers (a,b) and six water layers (c,d)

a,c. 多尺度分析; b,d. 小波包分析

根据组合曲线 $Rt \times \varphi_t^2$ 的小波分析,作出小波能量谱图(图 5),比较多尺度小波分析与小波包分析的差异.

图 5 是气层、水层共计 16 个层段的 $Rt \times \varphi^2$ 小

波能谱分析能量谱图. 将不同流体的能量最大的 2 个尺度位置进行统计(表 1)可以看出,在多尺度小波能谱分析上,气层的最大能量尺度值主要 ≥ 5 (占 70%),同时能量值较大. 水层最大能量的尺度值为

表 2 多尺度应用 4 个示例层统计

Table 2 Four samples level statistics of the multi-scale ications

井名	射孔井段 (m)	RLLD ($\Omega \cdot m$)	GR (API)	AC (US/M)	CNL (%)	DEN (g/cm^3)	φ_{PI} (%)	日产气 (m^3)	日产水 (m^3)	试气结论	主峰尺度	能量累计总值
X128	3 612~3 614	33.66	53.4	229.90	11.28	2.57	8.42	0	22.0	水层	4	0.42
X123	3 643~3 645	23.26	59.3	227.18	13.02	2.54	7.75	11 431	0	气层	5	0.91
X84	3 560~3 562	63.99	53.6	206.25	6.31	2.57	5.57	15 230	0	气层	4	1.92
X141	3 545~3 547	29.74	57.2	245.18	10.52	2.55	10.64	11 302	/	气层	5	2.35

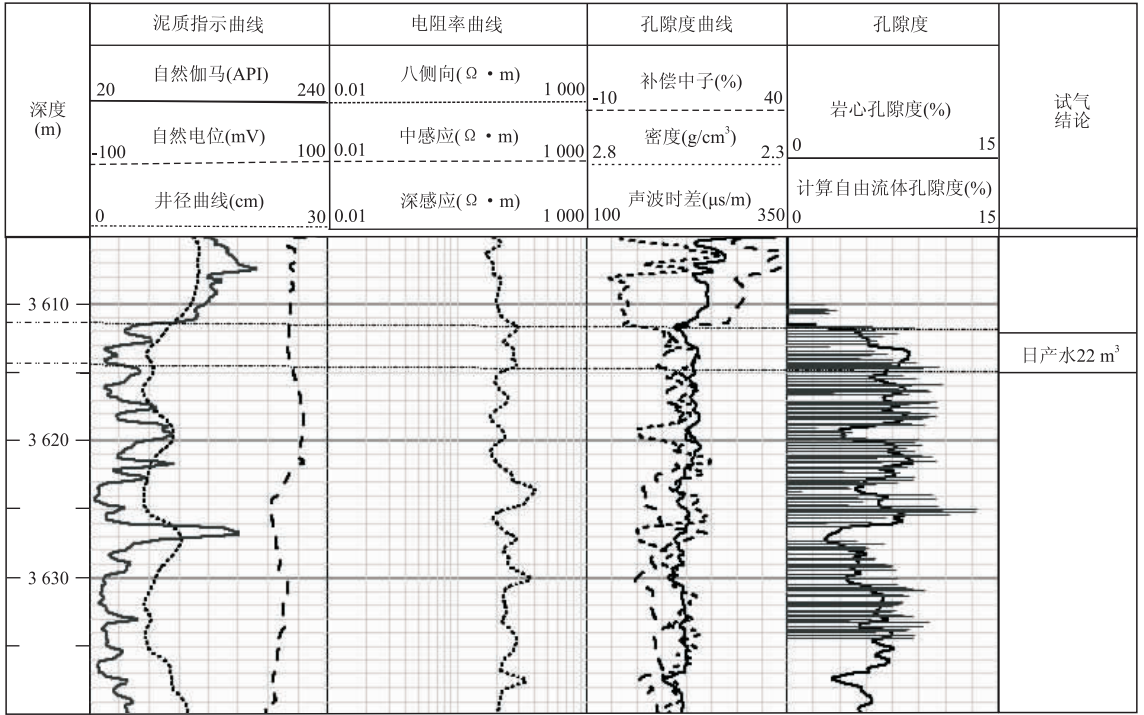


图 7 X128 井 3 612~3 614 m 段的测井曲线

Fig. 7 Well logging curve of 3 612 to 3 614 m in X128 well

≤ 4 (占 71%), 能量值较小. 因此多尺度小波能谱分析可以根据最大能量的尺度值识别出气层和水层. 在小波包能谱分析中, 气层、水层最大的 2 个能量的尺度, 尺度大于 5 的占了 87.5%, 但并不能根据能量集中的尺度值来识别气层、水层, 对于小波包能谱分析与致密砂岩气层的直观关系, 需要进行进一步探讨. 多尺度小波能谱以及小波包能谱整体特征在能谱图中各尺度之间的能量关系需要观察, 没有定量表示. 为了定量表示关系, 将各尺度上能量进行加权累加, 权值是尺度, 这样可以将各尺度上的能量特征与尺度结合在一起, 直观显示各尺度上能量的变化. 对多尺度小波能谱分析和小波包能谱分析的能谱进行加权累加, 得到结果如图 6.

图 6 是气层、水层共 16 个层段的 $Rt \times \varphi^2$ 小波能谱分析能量加权累计谱图. 多尺度小波能量加权累计谱中, 气层的能量累计总值均大于 1, 水层的小

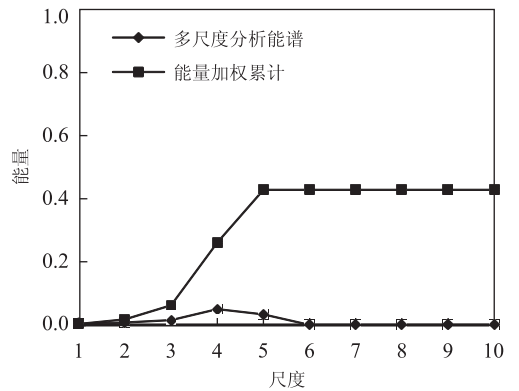


图 8 多尺度小波分析处理 X128 成果

Fig. 8 The multi-scale wavelet analysis and processing result of X128 well

于 1, 因此根据能量的累计总值可以识别以 1 为界限来区分的气层和水层. 小波包能量加权累计谱中, 气层的累计总值均大于 10 (占 80%), 水层的小于

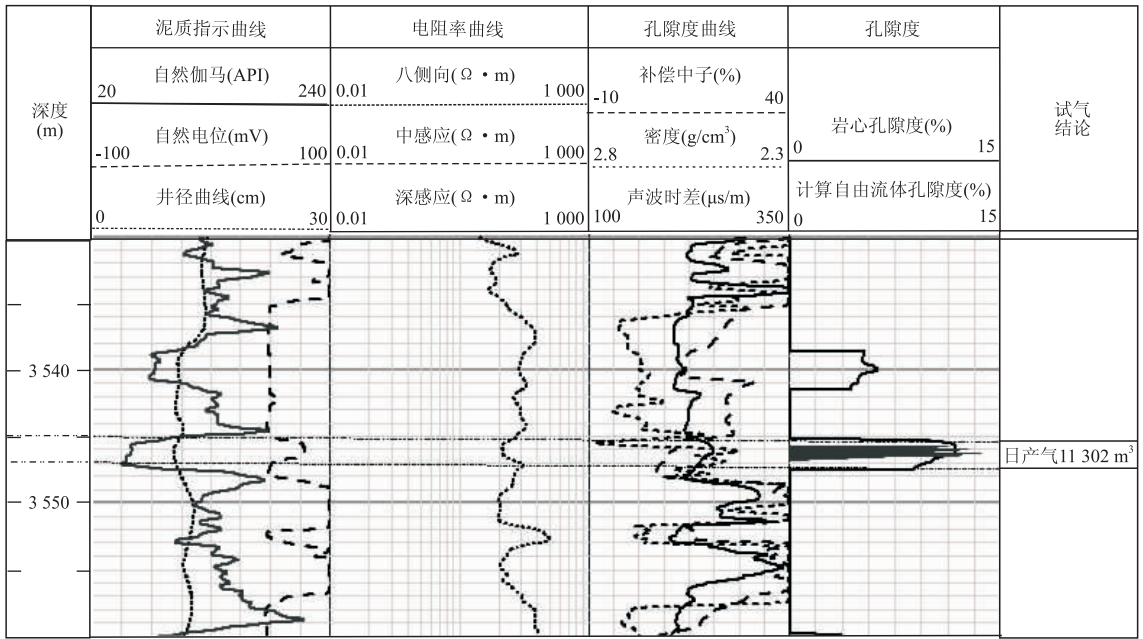


图 9 X141 井 3 545. 4~3 547. 4 m 段的测井曲线

Fig. 9 Well logging curve of 3 545. 4 to 3 547. 4 m in 141 well

10(占 71. 4%)。在多尺度小波分析和小波包分析的能量加权累加图中,在气层段上,尺度之间的能量累计曲线斜率较大,有较大的跳跃(也即波动较大),水层的尺度之间的能量累计曲线的斜率较小。因此可以根据能量累计谱中的能量累计总值大小来识别出水层。

根据多尺度小波能量分析和小波包能量分析的能量谱和能量累计谱可以得到,对于致密砂岩气层识别多尺度小波能量分析的气层和水层差异比较大,能量谱图上多尺度小波分析主峰值的位置 ≥ 55 为气层、 ≤ 4 为水层,而小波包的主峰值的位置在气层、水层却没有差别。能量加权累计谱上,多尺度小波能量分析的水层累计总能量 < 1 的占 100%,而小波包能量分析的水层累计总能量 < 10 的占 71. 4%。因此选择多尺度小波能量分析的能量谱和加权累计能量谱综合分析来识别致密砂岩气层。

致密砂岩气层的识别难度大,小波分析在致密砂岩气层识别中选择多尺度小波能量加权累计谱分析。本文应用多尺度小波能量加权累计谱分析取得较好效果。

3 综合应用比较

对常规识别致密砂岩气层方法识别致密砂岩流体性质与试气结果有差异的储层,利用多尺度小波

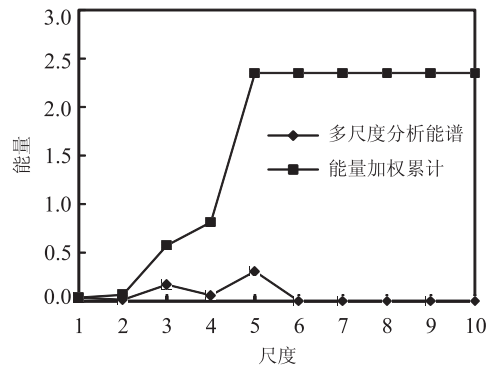


图 10 多尺度小波分析处理 X141 成果

Fig. 10 The multi-scale wavelet analysis and processing result of X141 well

分析处理,取得较好的效果。以苏里格西部地区致密砂岩测井曲线受储层的孔隙结构、非均质性影响,测井曲线响应复杂的储层 3 个试气结论为气层,1 个试气结论为水层为例,来展示多尺度小波分析识别气层可以避免常规分析受储层的孔隙结构及非均质性的影响(表 2)。

X128 井 3 612~3 614 m 段,试气结果是日产水 22 m³/d,无气,测井曲线(图 7)受储层的孔隙结构、非均质性影响,测井曲线响应复杂,电阻率偏高、声波时差偏大、中子、密度均减小,测井曲线直观上都指示其为气层,利用常规的测井方法解释是气层;而在小波多尺度分析上(图 8),多尺度能谱的最大峰值的尺度为 4,能量加权累加的总值为 0. 428,小于

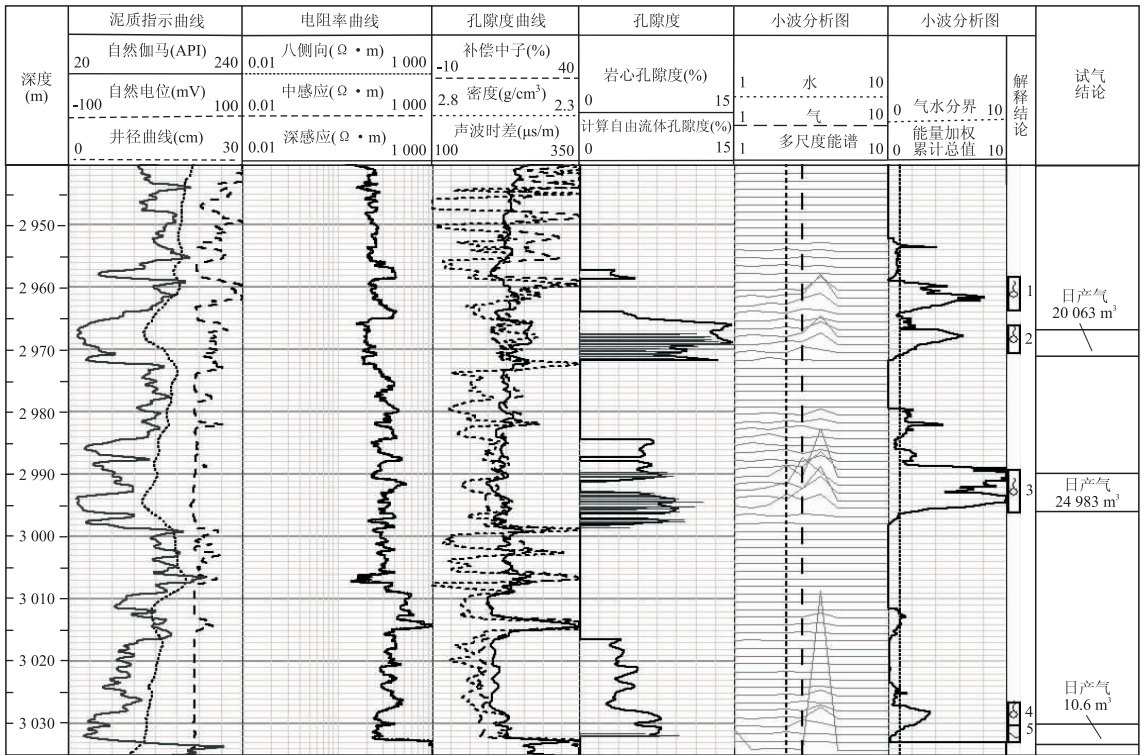


图 11 X60 井多尺度能谱处理成果综合图

Fig. 11 The complex chart of multi-scale energy spectrum analysis results of X60 well

1,均指示为水层,与试气结论一致。

X141 井 3 545. 4~3 547. 4 m 段,试气结果为 11 302 m³/d,无水,测井曲线(图 9)受储层的孔隙结构、非均质性影响,测井曲线响应复杂,电阻率偏低,声波波动不大,中子、密度减少,常规解释方法解释为气水层,认为含有水. 在多尺度小波分析上(图 10),多尺度能谱的最大峰值的尺度为 5,能量加权累加的总值为 3. 351,大于 1,指示为气层,与试气结论一致。

在整口井的实际应用中,使用滑动窗口处理法,处理曲线为 $Rt \times \varphi^2$,孔隙度使用三水模型计算的有效孔隙度,选择窗长为 40 个点,步长为 1 个深度点,并认为在流体性质稳定的层段内小波能谱分析特征稳定. 根据多尺度小波能谱分析的能谱以及能量加权累计谱特征可以识别致密砂岩气层. 在 forward 平台上实现多尺度小波能量谱分析,处理整口井。

图 11 是对 X60 井进行滑动窗小波多尺度能谱分析法处理成果图. 图中第 6 道是多尺度小波能谱图,第 7 道是多尺度小波能量加权累积总值曲线以及根据多尺度小波分析的能谱特征得到的解释结论. 在图中对于多尺度小波能谱的峰值位置有很直观的显示,在 2 965. 5~2 967. 5 m 段,日产气 20 063 m³, 2 993. 5~2 995. 5 m 段,日产气

24 983m³,这 2 层对应的多尺度小波能谱的峰值位置大于 5,多尺度小波能量加权累积谱上,能量加权累计的总值很大,曲线有很大的跳跃,在 3 028~3 032 m段,日产水 10. 6 m³,该层段对应的多尺度小波能谱的峰值位置小于 4,能量加权累计的曲线的波动不大,总值小于 1. 符合针对单层处理的结论。

利用滑动窗分析方法,将多尺度小波能谱分析应用于整口井连续处理中,多尺度小波能谱的峰值位置、以及能量加权累积总值可以直观地显示,使用小波多尺度能量加权累积总值定量标准去识别致密砂岩气层,应用效果较好。

4 结论与认识

在苏里格地区致密砂岩气层识别中,利用三水模型将电阻率信息集中在自由流体部分,对自由流体部分的小波能量分布进行分析流体具有较强的针对性,多尺度小波能谱以及加权累计能谱分析比小波包能谱及加权能谱分析有更好的效果. 多尺度小波能谱及能量加权累计能谱分析综合峰值位置显示、能量峰值的大小、能量加权累计能谱可识别气层、水层. 在井中应用时,利用滑动窗法,小波多尺度

分析的能量谱峰值的位置可以定性指示气、水层,能量加权累计总值的大小可以定量区分气、水层。

References

- Enrique, C. O., Morales, E. C. M., Zumaeta, M. L., et al., 2006. Identifying Reservoir Fluids in Sandy Clay and Carbonate Reservoir Using the Wavelet Transform with Well Logs. SPWLA 47th Annual Logging Symposium Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Veracruz.
- Gu, S., Cai, J. H., Chang, D. W., et al., 2015. Reducing Formation Damage to Low-Porosity and Low-Permeability CBM Reservoirs Using Calcium Carbonate Nanoparticles. *Earth Science*, 40(6): 1093—1100 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Shi, Y. J., Wang, L., et al., 2013. Logging Identification and Evaluation Technique of Tight Sandstone Gas Reservoirs; Taking Sulige Gas Field as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 24(1): 62—68 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. S., Zeng, Y. Q., Tian, J. B., et al., 2003. A Study on the Recognition Method of Tight Sandstone Gas Layers. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 25(1): 25—28, 58 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. J., Shi, Z., Zhang, H. T., et al., 2012. Fine Logging Interpretation Method of Tight Gas Reservoir in Sulige Gas Field. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 34(5): 71—77 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Sun, J. M., Tian, Y., et al., 2010. Identification of Reservoir Fluid Property Using Wavelet Energy Spectrum. *Progress in Exploration Geophysics*, 33(1): 36—39, 51 (in Chinese with English abstract).
- Yue, W. Z., Tao, G., 2003. A Method for Recognition of Fluid Property in Reservoirs Using Wavelet Transformation. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(6): 863—869

(in Chinese with English abstract).

- Zhang, L. H., Pan, B. Z., Li, Z. B., et al., 2010. New Three-Water Conduction Model and Its Application in Evaluation of Low Porosity and Low Permeability Reservoir. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(3): 431—435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Pan, B. Z., He, S. L., et al., 2012. Identification of the Features of Wavelet Analysis Based Reservoir Fluid. *Progress in Geophysics*, 27(6): 2554—2560 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W., Zhang, Y. M., Gui, L., et al., 2010. Application of Wavelet Analysis Based on MATLAB. Xi'an Electronic and Science University Press, Xi'an, 145—155.

附中文参考文献

- 谷穗, 蔡记华, 常德武, 等, 2015. 使用纳米碳酸钙降低低孔低渗煤层气储层伤害. *地球科学*, 40(6): 1093—1100.
- 李霞, 石玉江, 王玲, 等, 2013. 致密砂岩气层测井识别与评价技术——以苏里格气田为例. *天然气地球科学*, 24(1): 62—68.
- 李云省, 曾渊奇, 田建波, 等, 2003. 致密砂岩气层识别方法研究. *西南石油学院学报*, 25(1): 25—28, 58.
- 石玉江, 时卓, 张海涛, 等, 2012. 苏里格气田致密气层测井精细建模方法. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 34(5): 71—77.
- 王鑫, 孙建孟, 田艳, 等, 2010. 小波能谱识别储层流体性质. *勘探地球物理进展*, 33(1): 36—39, 51.
- 岳文正, 陶果, 2003. 小波变换在识别储层流体性质中的应用. *地球物理学报*, 46(6): 863—869.
- 张丽华, 潘保芝, 李舟波, 等, 2010. 新三水导电模型及其在低孔低渗储层评价中的应用. *石油地球物理勘探*, 45(3): 431—435.
- 张莹, 潘保芝, 何胜林, 等, 2012. 基于小波分析的储层流体性质识别. *地球物理学进展*, 27(6): 2554—2560.
- 周伟, 张一鸣, 桂林, 等, 2010. 基于 MATLAB 的小波分析应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 145—155.