

根据 AVO 响应识别不同流体类型的方法

余刚,王光付,竺知新

中石化石油勘探开发研究院,北京 100083

摘要 根据 AVO 的响应分类进行储层预测是目前油气勘探中最基础有效的油气勘探方法,但在实际应用中依然存在诸多问题,成功和失败的案例很多。主要原因是影响 AVO 响应的因素较多,例如岩性、物性、流体性质、成岩作用、地层压力、埋深等。本文以西非海域探井实际测得的物性参数为依据,设计了多个可能的岩石物理模型,并进行正演,归纳和总结了不同流体条件下,AVO 响应随埋深的变化特征。指出了浅层由含水砂岩造成的“亮点”与含油气砂岩在 AVO 响应特征的不同,对经典 AVO 分类在该地区的应用做了补充,并给出了该区 AVO 分类有效应用的经验深度范围。

关键词 AVO 分类;埋深;流体替换;正演模拟

中图分类号 P313

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.17.010

Identification Method for Various Fluids Based on AVO Responses

SHE Gang, WANG Guangfu, ZHU Zhixin

Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract At the present time, AVO responses classification is the basic and most efficient method to predict reservoir. However, there are still many problems in its applications. The number of successful cases is almost equal to number of unsuccessful cases. The main reason is that there are many factors which affect AVO responses, such as lithology, physical property, fluid property, lithogenesis, and burial depth, etc. Considering these factors, it is necessary to analyze specific AVO response for a particular area on the basis of classical AVO classification. Based on the physical property parameters surveyed in the actual drilled wells of western Africa offshore, several possible petrophysical models are designed, and some forward AVO modeling on different fluid substitutions at different depth interval is performed. It is summarized that the characteristics of AVO response changes at different depths on different fluid substitutions. The applications of AVO classification in this area are also improved and some empirically depth ranges in which the AVO classification could be effectively applied to is provided.

Keywords AVO classification; buried depth; fluid substitution; forward modeling

0 引言

目前业内公认并作为标准的振幅随偏移距变化(AVO)响应分类为 Rutherford 和 Williams^[1]提出的三类, Castagna 和 Swan^[2]补充后的四类,其中 II、III 类异常是烃类检测的有效标志,常以“暗点”或“亮点”特征出现在剖面上,尤其在浅海和部分深海沉积的砂岩油气藏中最为常见,比较典型的区域有墨西哥湾、巴西沿海、西非安哥拉海域。IV 类异常通常由低阻抗的气砂岩和浅层欠压实的沉积物产生,并不多见。由于浅层相对欠压实的含水砂岩也能产生 III 类异常,常常形成假“亮点”^[3],给使用 AVO 异常来寻找油藏带来困难,但浅层欠

压实砂岩中也存在着大量的油气藏,因此区分 III 类异常情况下不同流体的性质很有必要的。2003 年,Young 和 LoPiccolo^[4]拓展和部分重定义了当前使用的分类,基本概括了所有 AVO 响应类型,但仍无法确定同一种类型的响应特征对于不同的流体该如何区分。在西非安哥拉和尼日利亚的深海海域(平均水深 1500m,同为第三纪渐新统一上新统的浊积水道砂泥岩沉积)的 AVO 分类研究中发现,不同流体对于纵波波速度的影响侧重不同,产生的 AVO 特征不尽相同,因此本文找出一个根据 AVO 特征来有效区分该地区流体性质的方法,同时也给出了在西非海域 AVO 分类方法适用经验埋深范围。

收稿日期:2012-07-13;修回日期:2013-04-20

作者简介:余刚,工程师,研究方向为储层地球物理,电子信箱:shegang.syky@sinopec.com

1 叠前 AVO 技术的理论基础

Zoeppritz 方程是分析振幅随偏移距变化的理论基础,它考虑了纵横波入射的复杂情况,给出了计算反射波和透射波能量的公式,但公式较为复杂,参数之间的关系不直观,实际应用困难。Aki-Richards 方程是对 Zoeppritz 方程的线性近似^[1],有效入射角拟合范围为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$,超过 30° ,拟合误差逐渐增大。最初的 Aki-Richards 方程对于反射系数与入射角的关系表述并不直观,Swan 改写了该方程,给出了一个更直观但完全等价的三项式反射系数方程,其中每一项都较前一项权重更弱:

$$R(\theta) = A + B \sin^2 \theta + C \tan^2 \theta \sin^2 \theta \quad (1)$$

其中, θ 为入射角, $A = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right]$, $B = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \left[\frac{V_S}{V_P} \right]^2 \cdot \frac{\Delta V_S}{V_S} - 2 \left[\frac{V_S}{V_P} \right]^2 \frac{\Delta \rho}{\rho}$, $C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P}$, V_P 为 P 波速度, V_S 为 S 波速度, ρ 为介质密度。A 为零偏移距时的反射系数,它仅与 P 波速度 V_P 及密度 ρ 有关。B 为梯度项,受 P 波、S 波速度及介质密度影响,它与 $\sin^2 \theta$ 相乘对非零偏移距的振幅影响最大。C 为曲率项,仅受 P 波速度影响,由于它与 $\tan^2 \theta \sin^2 \theta$ 项相乘作为第 3 项,当入射角小于 30° 时, $\tan^2 \theta \sin^2 \theta$ 是一个很小的量,因此,第 3 项对反射系数的贡献很小,但对于偏移距大的振幅,如入射角大于 30° 时,影响明显增大。

2 岩石物理随深度变化的趋势

图 1 为使用实测钻井中含有不同流体的砂岩和泥岩纵横波阻抗随埋藏深度变化的趋势预测,目的是观察埋深变化对阻抗的影响,这里虽然仅考虑埋深,但必须指出,其他因素例如矿物成分、孔隙压力、流体性质、地层有效压力等也存在

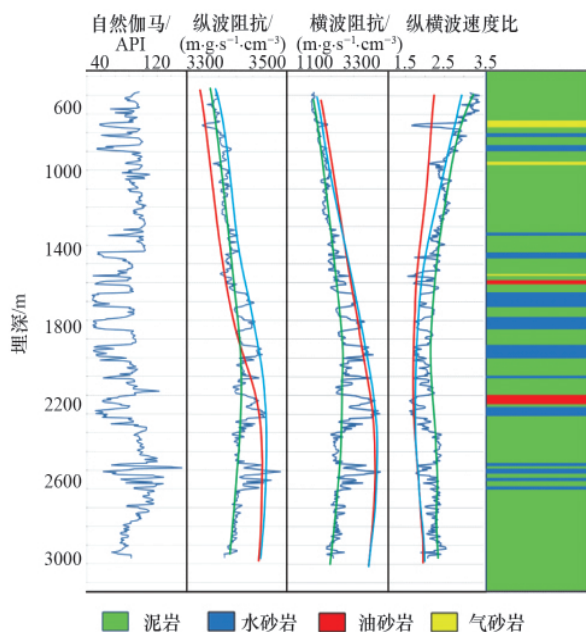


图 1 纵横波阻抗随埋藏深度变化的趋势预测

Fig. 1 Trend prediction on P and S impedances changing with burial depth

对速度的影响。由于该区的沉积环境为第三系中新统浊积水道砂体沉积,岩性主要为砂岩和泥岩,不同埋深条件下的压实和固结作用对速度和密度的影响起主导作用,因此将埋深和速度的关系作为主要的分析对象。

从图中可以看出,在浅层,含油砂岩的 P 波阻抗小于泥岩,但随着深度的增加,它将在某一深度处接近并逐渐超过泥岩,在深层,含油砂岩和含水砂岩则 P 波阻抗接近,并明显大于泥岩。在 S 波阻抗上,浅层砂岩在含有油、气、水时其 S 波阻抗均大于泥岩,在遇到含油气砂体时, P 波能量被大量吸收而 S 波能量基本不损失是产生 II、III 类 AVO 响应的先决条件。这里还需要注意的是,在浅层,含水砂岩会吸收 S 波能量而对 P 波影响较小,因此含水砂岩中 S 波阻抗是低于含气或含油砂岩时的 S 波阻抗的,这也是浅层欠压实砂岩中形成类似 III 类 AVO 响应从而与含气砂岩的 AVO 特征混淆难以辨别的原因。

3 不同埋深储层的 AVO 正演模拟

虽然这种不同流体的类似 AVO 响应特征早已被 Castagna 等^[9]提出,但只作为一个需要警惕的因素来说明而未提出解决办法,本文通过对实际叠前资料的分析 and 不同流体条件下的 AVO 正演模拟,发现了它们的不同,从而找到一个在浅层欠压实砂岩储层中区分不同流体性质的方法。

首先,针对不同埋深的储层做基于不同流体的 AVO 正演模拟,流体替换原理基于 Biot-Gassmann 方程,其由 Gassmann 和 Biot 创建,对非固化的气砂岩匹配较好^[9-11],但对于与孔状介质(存在不调和饱和状态)或裂缝类型介质则不准确^[12],从图 1 可看出,当埋深大于约 2100m 时,阻抗将不再与埋深成正比,而随着埋深的增加而减小,这是由于随着压力增大裂缝型介质开始占主导造成的,水砂或泥岩将不再满足 ARCO 的泥岩基线的经验公式,因此正演模拟选取的埋深范围为 500~2100m。

图 2 为埋深为 543m 的砂岩气藏及流体替换的 AVO 正演模拟,图 2(a)为测井曲线,图 2(b)不同流体条件下的 AVO 合成记录道,图 2(c)为砂岩顶界面(图左红线所示)反射的梯度 γ 和截距 x 的交会,可以看出 3 种流体条件下,振幅都随入射角的增加而增加,但梯度和截距各有不同,水砂岩(绿色)的截距为正,与含油(红色)或含气(蓝色)的砂岩相反,在梯度变化上,以含气砂岩的振幅随入射角的增加而增加的最快。

图 3 为埋深为 898m 的含水砂岩及流体替换的 AVO 正演模拟,从图 3(c)可看出水砂顶界面反射振幅随入射角增加的速度有所降低,而当流体为气体时,振幅的增加速度非常快,油层次之。

图 4 为埋深为 1215m 的含水砂岩及流体替换的 AVO 正演模拟,可以看出含水砂岩顶界面的截距和梯度都很小,3 种流体条件下,截距均为负,水砂的振幅随入射角减小,这表明含水砂岩同围岩的阻抗差较小,油层和气层的梯度和截距特

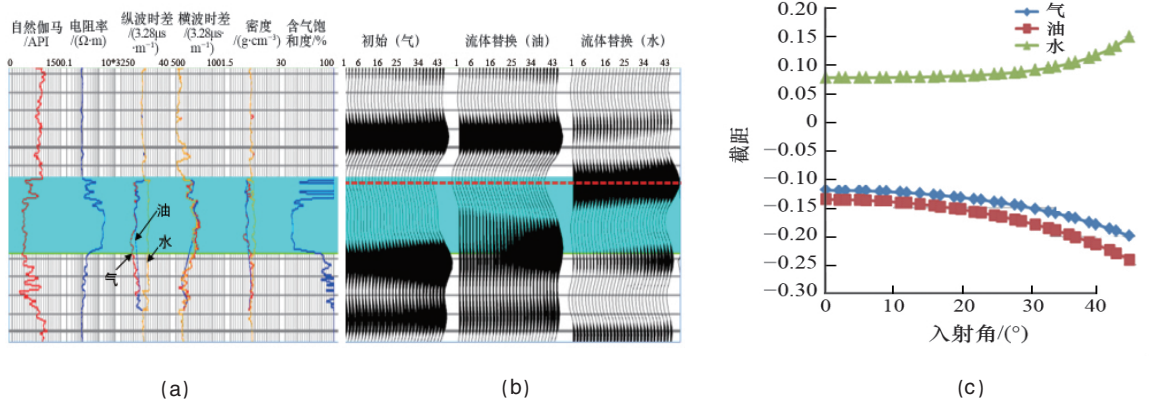


图2 砂岩气藏流体替换正演模拟(543m)
Fig. 2 AVO forward modeling in the situations of different fluids of gas sand (543m)

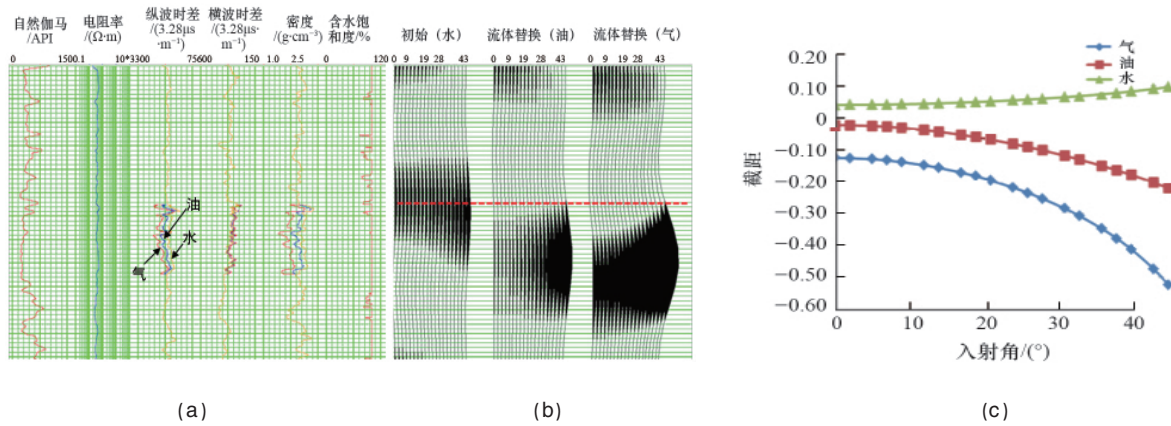


图3 含水砂岩流体替换正演模拟(898m)
Fig. 3 AVO forward modeling in the situations of different fluid substitutions of wet sand (898m)

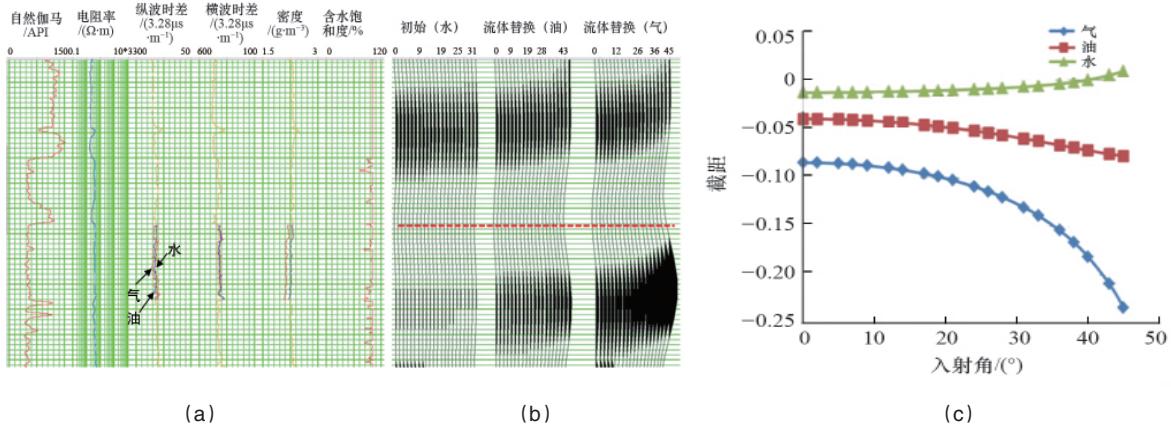


图4 砂岩气藏流体替换正演模拟(1215m)
Fig. 4 AVO forward modeling in the situations of different fluids of gas sand (1215m)

征同图3一致。

图5为埋深为2009m的含水砂岩及流体替换的AVO正演模拟,3种流体条件下,砂岩顶界面反射的截距梯度特征

为,截距都为正且都比浅层的砂岩小,梯度都为负,油层振幅随入射角的增大,振幅逐渐趋于0,气层振幅在入射角约25°处发生反转。

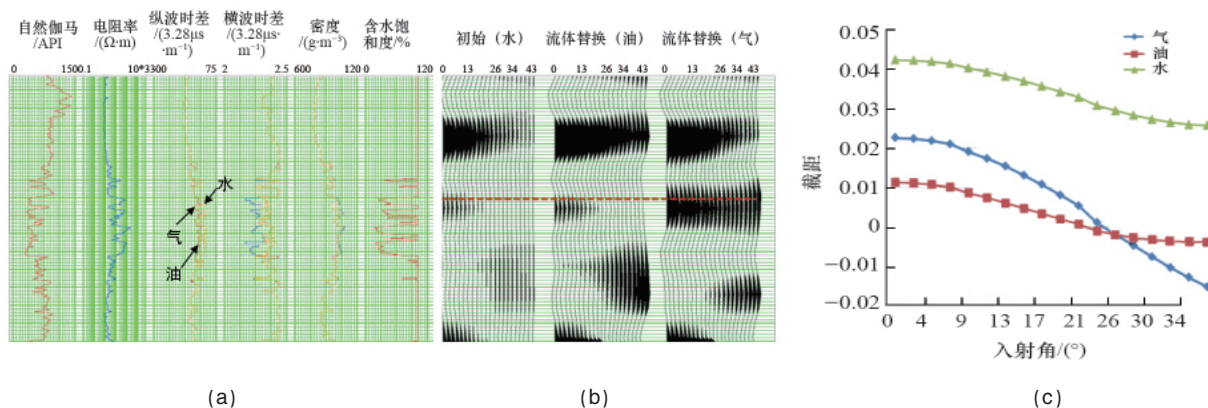


图 5 砂岩气藏流体替换正演模拟 (2009m)
Fig. 5 AVO forward modeling in the situations of different fluids of gas sand (2009m)

4 不同埋深和流体的 AVO 响应特征

将 AVO 梯度和截距的响应特征类型反映到以截距为横轴,以梯度为纵轴的坐标图上(图 6),可以更直观地反映出不同流体、不同埋深的 AVO 响应特征之间的关系,注意到在浅层的砂体中,含有油或气时会有相对较大的梯度特征,同时反射系数的极性与含水时相反,而随着深度的增加,含水砂岩的梯度变化会逐渐减小。

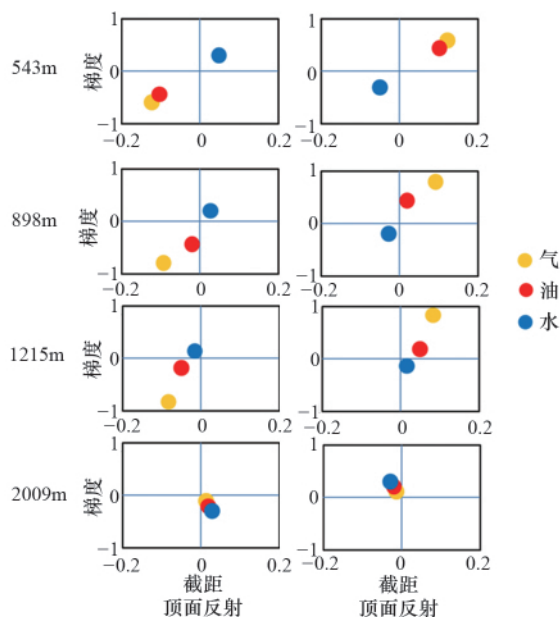


图 6 不同流体条件下砂体顶底面反射的 AVO 分类图
Fig. 6 AVO classification figures of top surface reflectors of sand body in the situations of different fluids

可以大致归纳不同埋深条件下,含有不同流体的砂岩界面的 AVO 响应特征(表 1)。

根据两个深海海域共 10 口井的 AVO 类型特征统计,在一定的埋深范围(尼日利亚大约 1200~2300m,安哥拉大约 1200~2000m)内,含水砂岩顶界面的其反射系数不随入射角

的增加而增加,因此对使用 AVO 响应特征进行流体识别的干扰很小。当埋藏深度大于约 2000m 时,不同流体条件下的 AVO 响应特征区别不明显,这是由于基质逐渐固结,流体对其体模量的影响减小所致。

表 1 不同埋深条件不同流体的砂岩顶界面的 AVO 响应特征
Table 1 AVO response features of top surface reflectors of sand body in the situations of different fluids and different burial depths

埋深/m	气	油	水	振幅与偏移距的关系
<900	III	III	-III	反射振幅都较强,振幅随偏移距增加,但水层振幅极性与前两者相反
900~1200	III	II	-II	油层和水层振幅极性相反,振幅较弱并都随偏移距缓慢增加,气层振幅极性与油层相同,振幅随偏移距迅速增加。
1200~2000	III	II	I	三者振幅极性相同,水层振幅最小并随偏移距减小,在远道可能穿过零值线,油层振幅略强并随偏移距缓慢增加,气层振幅最强,随偏移距迅速增加
>2000	I	I	I	三者振幅极性相同,油层振幅最小,气层略大,水层最大,三者都随偏移距减小,油层和气层在远道可能穿过零值线

注: AVO 的响应特征是随埋深逐渐变化的,无法准确估计不同类型转化的埋深阶跃点,因此这里是经验深度范围。“-”表示在相同埋深或压实条件下,含有不同流体时, AVO 响应类型相似但极性相反。

Notes: Since AVO response features are incessantly changing with burial depth, it is impossible to estimate the points of step change. Here are the empirical depth ranges, “-” means that in the situations of different fluids and in the same condition of burial depth or consolidation, the classifications of AVO response are similar, however their polarities are opposite.

5 结论

(1) 在西非尼日利亚、安哥拉的深海海域(平均水深约1500m,第三纪渐新统一上新统)的浅层,含气或含油砂岩的P波阻抗是最低的,小于含水砂岩并且更小于泥岩,而S波阻抗不会比干砂岩有明显减小,这是形成II、III类AVO特征的原因。含水砂岩的S波阻抗低于干砂岩或含油气砂岩,但会大于含气砂岩,这是造成含水砂岩的反射系数随入射角增加而增加的原因,但相比含油气砂岩的AVO梯度和截距都明显较小,且在同一界面上,它们的反射系数的极性相反。

(2) 在对某一地区的储层进行流体性质区分时,应首先用井标定,并将正演模拟结果同原始地震数据对比以确定不同流体的AVO响应特征,以此对模型进行流体性质区分及预测。

(3) 不同地区由于各种因素会有不同的AVO响应特征,本文只针对西非海域河流相沉积的砂岩,在不同地区、不同沉积环境应该使用已知井建立适合该区的AVO响应特征并确定AVO技术适宜应用的埋深范围。

参考文献

- [1] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude versus offset variations in gas sands[J]. Geophysics, 1989, 54(6): 680-688.
- [2] Castagna J P, Swan H W. Principles of AVO crossplotting[J]. The Leading Edge, 1997, 16(4): 337-344.
- [3] Allen J L, 王江, 李子顺. AVO失败实例及其经验教训[J]. 国外油气勘探, 1994, 6(4): 450-458.
Allen J L, Wang Jiang, Li Zishun. Abroad Oil Prospecting, 1994, 6(4): 450-458.
- [4] Rogera A, Robert Y, LoPiccolo D. A comprehensive AVO classification [J]. The Leading Edge, 2003, 22(10): 1030-1037.
- [5] 郑晓东. Zoeppritz方程的近似及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1991, 26(2): 129-144.
Zheng Xiaodong. Oil Geophysical Prospecting, 1991, 26(2): 129-144
- [6] Castagna J P, Swan H W, Foster D J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 948-956.
- [7] Box R, Doss E. Typical AVO response as a function of depth and fluid pressure gradient: Gulf of Mexico shelf[J]. The Leading Edge, 2008, 27(10): 1252-1262.
- [8] Eissa M A, Castagna J P. Case study: AVO analysis in a high-impedance Atoka Sandstone (Pennsylvanian), North Arkoma Basin, McIntosh County, Oklahoma[J]. The Leading Edge, 2003, 22(10): 988-997.
- [9] 殷八斤. AVO技术的理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Yin Bajin. Theory and application of AVO technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [10] 杨绍国, 周熙襄. Zoeppritz方程的级数表达式及近似[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(4): 399-413.
Yang Shaoguo, Zhou Xixiang. Oil Geophysical Prospecting, 1994, 29(4): 399-413.
- [11] 钟森. AVO反演纵、横波速度[J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3): 373-378.
Zhong Sen. Oil Geophysical Prospecting, 1995, 30(3): 373-378.
- [12] 齐虹, 桂志先, 王宁, 等. 砂岩薄互层AVO正演模型研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(3): 71-74.
Qi Hong, Gui Zhixian, Wang Ning, et al. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(3): 71-74.
- [13] 徐丽英, 方炳钟, 孙立旭, 等. AVO技术在铁匠炉地区油气检测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(5): 73-77.
Xu Liying, Fand Bingzhong, Sun Lixu, et al. Northwest Oil & Gas Exploration, 2011, 23(5): 73-77.
- [14] 邓友茂, 李录明. 含气砂岩AVO正演模型研究[J]. 内蒙古石油化工, 2007, 33(10): 85-89.
Deng Youmao, Li Luming. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007, 33(10): 85-89.
- [15] 左国平, 吕福亮, 范国章, 等. AVO技术在孟加拉湾含气性检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(S1): 60-66.
Zuo Guoping, Lü Fuliang, Fan Guozhang, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(S1): 60-66.
- [16] 涂齐催, 刘江, 崔树果, 等. AVO与流体替换相结合识别深层I类气藏[J]. 海洋石油, 2011, 31(2): 25-28.
Tu Qicui, Liu Jiang, Cui Shuguo, et al. Offshore Oil, 2011, 31(2): 25-28.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



科学家与媒体面对面

为充分发挥科学共同体、全国学会和大众媒体的作用,结合社会热点、焦点开展科普,建立一个科学家与大众媒体广泛沟通的渠道,中国科学技术协会于2011年3月19日启动“科学家与媒体面对面”系列科普活动。

“科学家与媒体面对面”由中国科协科普部、调宣部主办,每期活动围绕社会科普热点,确定一个主题,邀请该领域2~4位专家与媒体记者面对面交流,在平等活泼、轻松自然的氛围下,发出科学共同体的理性声音,引导社会舆论。

详见中国科协网 <http://tech.sina.com.cn/d/scimedia/index.shtml>。