

基于地震资料的三种岩性流体预测方法对比分析

刘 伟, 曹思远

(中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249)

摘 要 利用地震资料识别储层流体是储层预测的一项重要内容,对储层流体的识别是通过流体识别因子来实现的.首先引入三种流体识别因子并介绍其预测流体的方法原理,在此基础上以湿砂岩和含气砂岩为例,对比分析了不同流体识别因子对流体的敏感度,然后通过一个具体实例进一步验证了不同方法的特点.分析结果表明,第三种方法对流体的敏感度最高,能更准确地表征岩石孔隙中流体的性质.

关键词 地震资料,流体识别,纵波波阻抗,横波波阻抗

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)06-1918-06

Comparison and analysis of three fluid identification technologies based on seismic data

LIU Wei, CAO Si-yuan

(Key Lab of Geophysical Exploration under CNPC, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract The fluid identification is an important content of reservoir prediction by using seismic data. The identification of reservoir fluid is completed by fluid identification factors. First of all, this paper proposes three fluid identification factors and analyzes the basic principles of fluid prediction technologies. Taking an example of wet sandstone and gas sandstone, the paper compares the sensitivity of fluid identification factors to different fluids. In addition, the paper illustrates characters of different technologies by means of a true example. The result shows that the third technology is highly sensitive to fluid and it can demonstrate property of fluid in rock pore.

Keywords seismic data, fluid identification, P-wave impedance, S-wave impedance

0 引 言

在常规的石油勘探中,地震资料的构造解释、地层岩性解释、各种属性解释及综合应用发挥了重要作用.随着勘探的深入和储层越来越复杂,常规地震解释技术在隐蔽油气藏勘探方面已显得力不从心.人们往往希望能从实际地震资料中提取更多反映储层流体的信息,储层地震弹性属性^[1~4]的研究为此提供了一条有效的途径.近几年来,人们从地震弹性属性出发提出了许多识别流体异常的方法,例如 LMR(Lambda-mu-rho)法^[5]、Russell 法^[6]、直接识别油气(DHI)法^[7]、孔隙模量法等.这些方法均取得了一定的应用效果.

为此,我们针对三种流体预测因子的敏感性进

行了分析研究,通过对比指出第三种方法对于预测流体更具优越性.

1 三种岩性流体识别因子

在储层预测中,人们已经提出了许多流体识别因子,这些因子通常可以写成纵波阻抗与横波阻抗的组合形式.纵波阻抗 I_P 和横波阻抗 I_S 的基本定义为

$$I_P = \rho v_P, \quad (1)$$

$$I_S = \rho v_S, \quad (2)$$

式中, ρ, v_P, v_S 分别为岩石的密度、纵波速度和横波速度.下面给出几个具体的流体识别因子.

(1)泊松比:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \frac{\left(\frac{I_P}{I_S}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{I_P}{I_S}\right)^2 - 1\right)}, \quad (3)$$

式中, σ 为泊松比, λ 和 μ 分别为第一和第二拉梅系数, I_P 为纵波阻抗, I_S 为横波阻抗.

(2) Goodway 等提出的识别因子:

$$\lambda\rho = I_P^2 - 2I_S^2, \quad \mu\rho = I_S^2, \quad (4)$$

其中, ρ 为密度, 其它变量同上.

(3) Russell 等提出的流体属性:

$$\rho f = I_P^2 - cI_S^2, \quad (5)$$

其中, f 为流体参数, c 为变量, 其它变量同上.

2 岩性流体预测的方法原理

2.1 泊松比技术

泊松比(公式(3))是反映岩性和含油气性的重要参数^[8~12], 一般泊松比的低值对应地层的含油气, 当然也要结合测井和录井等资料进行综合判断. 泊松比是一个与岩石的矿物成分、结构、构造、孔隙度和含水饱和度等有关的无量纲参数, 能够较深刻反映岩体的岩石特征和构造变化规律^[13,14].

一般来说, 岩石固结程度越高, 其泊松比越小, 松散风化表层的泊松比可高达 0.45. 泊松比随岩性、孔隙和流体成分的变化而变化, 变化范围一般在 0~0.5 之间. 如果泊松比的值大于 0.5 或小于 0, 则说明介质存在各向异性.

在实际应用中, 当储层的岩性确定时, 泊松比的变化信息可以用以区分地层含油、含气或含水. 例如, 页岩泊松比的变化范围是 0.3~0.4, 含油砂岩泊松比的变化范围是 0.2~0.25, 含气砂岩泊松比的变化范围是 0.1~0.18.

2.2 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会技术

我们知道液体有体积模量而没有剪切模量, 因此可以通过分析岩石的拉梅系数来研究岩石中孔隙流体的性质.

各向同性弹性无孔介质的纵、横波速度方程为

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (6)$$

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (7)$$

式中, ρ 为密度; λ 为第一拉梅系数; μ 为第二拉梅系数; v_P 为纵波速度; v_S 为横波速度.

将方程(6), (7)两边平方再乘以密度 ρ 可以得到方程

$$v_P^2\rho = \lambda + 2\mu, \quad (8)$$

$$v_S^2\rho = \mu, \quad (9)$$

联立求解方程(8)和方程(9)可得到拉梅系数与密度的乘积与纵波及横波阻抗的关系式

$$\lambda\rho = I_P^2 - 2I_S^2, \quad (10)$$

$$\mu\rho = I_S^2, \quad (11)$$

式中, I_P 和 I_S 分别为岩石的纵、横波阻抗.

在地震资料的储层描述中, 常用 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 来描述岩石的岩性和岩石孔隙的流体的性质. 以往的研究已表明, 用 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 来区分岩性和含油气性, 比单独应用 λ, μ, I_P 和 I_S 进行岩性和含油气性分析效果更好. 而 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 剖面可通过 AVO 的联合反演实现, $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 剖面可以比较直观地解释含油气储层. 一般地说, 砂岩的不可压缩性比页岩大, 致密砂岩的不可压缩性比含气砂岩大, 而页岩的刚性比砂岩小. 流体的变化不影响介质的刚性. 由于孔隙的类型和数量的变化, 碳酸盐岩的不可压缩性和刚性之间的差异较大. 也可以简单认为, $\lambda\rho$ 是孔隙流体指示因子, 烃类化合物表现为低值, 而 $\mu\rho$ 是岩性指示因子, 砂岩表现为高值. 对于那些在地震剖面上不易识别的岩性和流体, 利用这种方法比较有效.

		致密砂岩	碳酸盐岩
$\mu\rho$	含气砂岩	砂岩	
	煤层	页岩	
		$\lambda\rho$	

图 1 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会图解释原理^[15~16]

Fig. 1 Chart for the interpretation of $\lambda\rho$ and $\mu\rho$ sections based on the crossplot

2.3 ρf 和 ρ_s 交会技术

$\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会分析的基础是各向同性弹性无孔介质的纵、横波速度方程. 事实上, 地下岩石是一个饱含流体的多孔介质, 因此方程(6)和方程(7)必然不能反映地下真实介质的情况. Biot 和 Gassmann 最早认识到这一问题, 他们设计了一个理想的饱含流体的多孔介质模型^[17~19]. 从该模型可知, 对于一个饱含流体的多孔介质, 可以分成干燥岩石和流体两个部分进行考虑. 因此, 饱含流体多孔介质的纵、横波速度方程可以用下面的公式表示

$$v_P = \sqrt{\frac{(\lambda_{dry} + 2\mu + \beta^2 M)}{\rho_{sat}}}, \tag{12}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_{sat}}}, \tag{13}$$

$$\frac{1}{M} = \frac{(\beta - \Phi)}{K_m} + \frac{\Phi}{K_{fl}}. \tag{14}$$

式中, λ_{dry} 为干燥岩石的第一拉梅系数, β 为 Biot 系数, K_m 为岩石骨架的体积模量, K_{fl} 为孔隙流体的体积模量, Φ 为岩石孔隙度, ρ_{sat} 为流体饱和的岩石密度.

比较公式(6)和(12)可以发现, 对于无孔介质和饱和流体的多孔介质来说, 它们之间最大的差异在于公式(12)中多了 $\beta^2 M$ 一项. 这一项显然就是流体的表征项. 可记流体参数 $f = \beta^2 M$ 和干燥岩石参数 $s = \lambda_{dry} + 2\mu$, 这样方程(12)就可以表示为

$$v_P = \sqrt{\frac{(s + f)}{\rho_{sat}}}, \tag{15}$$

联立公式(12)和(13)可得到

$$\rho_{sat} f = I_P^2 - cI_P^2, \tag{16}$$

$$\rho_{sat} s = cI_S^2, \tag{17}$$

其中,

$$c = \left(\frac{v_P}{v_S}\right)_{dry}^2 = \frac{\lambda_{dry}}{\mu} + 2. \tag{18}$$

与 $\lambda\rho \sim \mu\rho$ 交会技术相比, 由于 $\rho s \sim \rho f$ 交会技术充分考虑了地下真实多孔介质的情况, 它可以更直接

地、更准确地表征岩石孔隙中流体的性质. 而且, 不难看出, 当 c 等于 2 时, $\rho f \sim \rho s$ 交会方法就演变成了 $\lambda\rho \sim \mu\rho$ 交会方法.

要成功地运用 $\rho f \sim \rho s$ 交会技术识别流体, 就必须准确地求取参数 c 的值. 这里我们直接引用文献 [8] 推导出的公式

$$c = \left[\frac{v_P}{v_S}\right]_{dry}^2 = \left[\frac{v_P}{v_S}\right]_{sat}^2 (1 - \Phi), \tag{19}$$

式中, v_P 为纵波速度, v_S 为横波速度, Φ 为岩石孔隙度, 这些数据可以通过测井资料获得. 公式(19)有力地保证了孔隙流体参数严格的地球物理意义, 保证了利用 $\rho f \sim \rho s$ 交合法定量分析孔隙流体性质的可靠性.

ρf 和 ρs 交会解释的原理可以参见上述方法二中的表 1, 不过由于 ρf 对流体的敏感度要高于 $\lambda\rho$ (在下面计算得到的数据中有所体现), 所以 ρf 和 ρs 交会解释的精度要高于 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交合法.

3 地震弹性属性的应用分析

3.1 基于模型的数值计算比较

我们以 Hiltermann 给出的三类砂岩模型为例, 计算和比较了几种流体识别因子(见表 1)对流体的识别能力.

表 1 各种流体识别因子识别能力对比

Table 1 The sensitivity analysis of several fluid identification factors

介质	v_P ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_S ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\rho(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	I_P ($10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	I_S ($10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	σ	$\lambda * \rho$	$\rho * f$
第 3 类砂岩								
湿砂岩	2.134	0.860	2.110	4.502	1.814	0.403	13.687	12.482
含气砂岩	1.543	0.901	1.880	2.900	1.694	0.241	2.671	1.620
相对变化率(%)				36	7	40	80	87
第 2 类砂岩								
湿砂岩	3.048	1.595	2.230	6.797	3.557	0.311	20.895	12.051
含气砂岩	2.781	1.665	2.080	5.785	3.463	0.221	9.482	1.099
相对变化率(%)				15	3	29	55	91
第 1 类砂岩								
湿砂岩	4.115	2.453	2.320	9.546	5.691	0.224	26.351	8.311
含气砂岩	4.050	2.526	2.210	8.951	5.583	0.182	17.781	0.419
相对变化率(%)				6	2	19	33	95

注: $\rho * f$ 计算时, 第 3 类砂岩取 $c = 2.336$, 第 2 类砂岩取 $c = 2.699$, 第 1 类砂岩取 $c = 2.557$.

由表 1 我们可以看出,纵波波阻抗可以区分第 3 类和第 2 类砂岩中的湿砂岩和含气砂岩(波阻抗相对变化率分别为 36% 和 15%),不能区分第 1 类砂岩中的湿砂岩和含气砂岩(波阻抗相对变化率为 6%);横波波阻抗在 3 类砂岩中都比较小(7%, 3%, 2%),不能区分湿砂岩和含气砂岩;而泊松比 σ 、弹性参数 $\lambda\rho$ 和 ρf 在 3 种模型中的相对变化率都明显大于纵波波阻抗,所以它们对流体的识别能力更强,在 3 类砂岩模型中都能将湿砂岩和含气砂岩区分开来,不同的是这 3 个参数对流体的敏感度不同,其中最高的是 ρf ,其次是 $\lambda\rho$,最后是 σ 。

3.2 泊松比解释应用实例

下面几幅图是根据实际测井资料计算所得,所

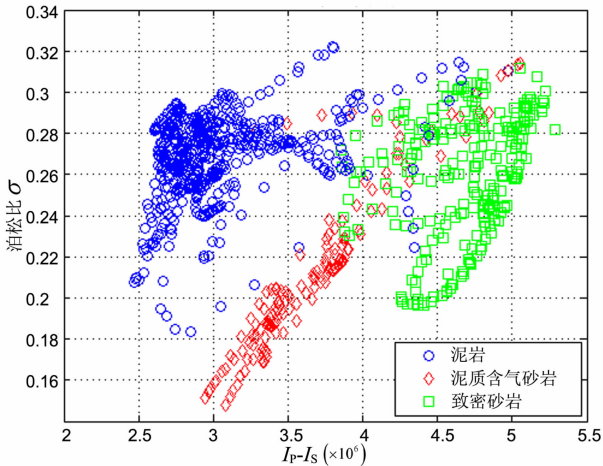


图 2 $I_P - I_S$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和泊松比交会图
Fig. 2 A cross-plot of $I_P - I_S$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) vs Poisson's ratio

选取的层段为 2490~2560 m 和 2720~2745 m,据测井资料解释,2510~2525 m 为泥质含气砂岩;2490~2510 m 和 2525~2560 m 为泥岩;2720~2745 m 为致密砂岩。

从图 2 我们可以看出 $I_P - I_S$ (纵波波阻抗与横波波阻抗之差)和泊松比交会图可以较明显地将三种岩性流体区分开来,其中泊松比较低的是泥质含气砂岩,泊松比较高的是泥岩和致密砂岩,但是致密砂岩的 $I_P - I_S$ 要高于泥岩. 相比而言,图 3 仅仅能区分泥质含气砂岩。

3.3 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 联合解释实例

所选取的层位与上面相同. 图 4 是由计算得到的 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会图,可以将三种岩性或流体区分出

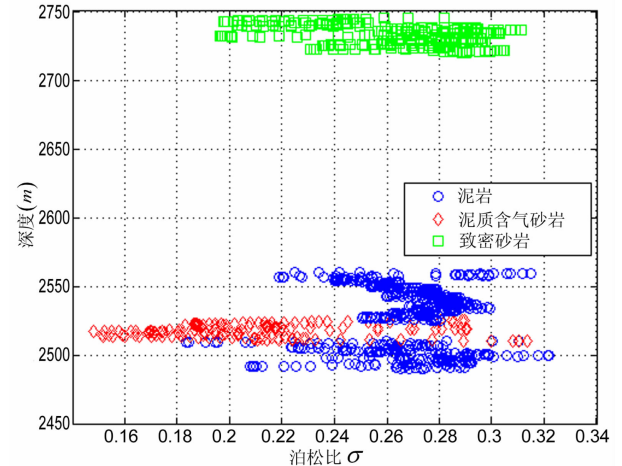


图 3 泊松比和深度(m)交会图

Fig. 3 A crossplot of Poisson's ratio vs depth (m)

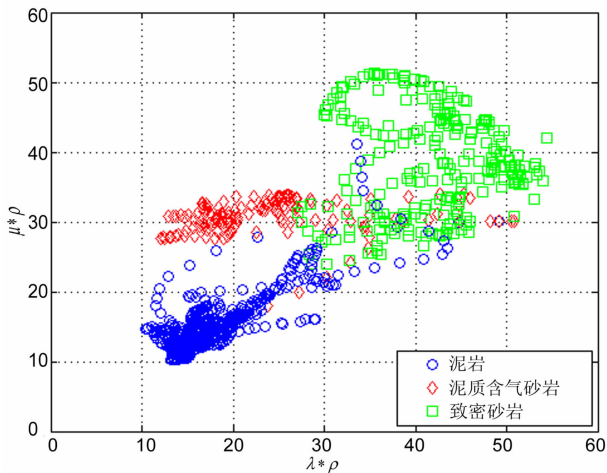


图 4 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会图

Fig. 4 A crossplot of $\lambda\rho$ vs $\mu\rho$

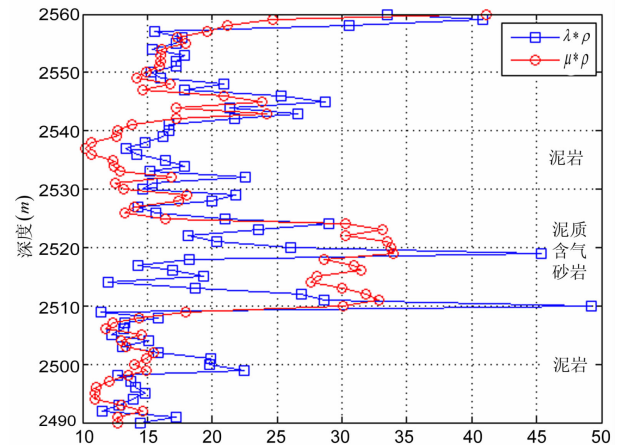


图 5 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 曲线图

Fig. 5 A relationship curve of $\lambda\rho$ and $\mu\rho$

来, $\mu\rho$ 值较低的解释为泥岩, $\mu\rho$ 值较高的解释为致密砂岩, 中间值解释为泥质含气砂岩. 图 5 是 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 曲线图, 可以看出 $\mu\rho$ 大于 $\lambda\rho$ 的区域是泥质含气砂岩, $\mu\rho$ 小于 $\lambda\rho$ 的区域是泥岩, 泥质含气砂岩与泥岩之间是致密的薄层.

3.4 ρf 和 ρs 联合解释实例

所选取的层位与上面相同. 图 6 至图 9 分别显示 c 取 1.333, 2.0, 2.333, 2.5 时 ρf 和 ρs 交会图, 分析这 4 幅图可以发现: c 取 1.333 时(图 6), 岩性流体分割线是倾斜线, 不够直观; c 取 2.5 时(图 9), 在 ρf 轴上出现负值; 图 7 和图 8 两种结果十分相似, 然而最佳的 c 值应取 2.333, 因为图 8 中含气点

在 ρf 轴上更加趋于原点(零值点), 更能显示其含气的特性. 实际上 c 取 2.0 时的结果就相当于 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会图的结果, 即图 9 等价于图 4.

由于岩性流体识别因子尤其是 ρf 的敏感性较强, 因此在信噪比较低的数据中有可能把噪音也突出了, 再者, 在计算过程中误差的传播对结果的影响也比较大, 正如 Gray(2002)所言, 由于误差传播所引起的 $\lambda\rho$ 值的偏差是初始 I_p 和 I_s 偏差的至少 4 倍.

敏感流体识别因子计算结果中的低异常, 可能指示含气、含油或含水, 计算结果突然降低的地方, 含气、油、水的可能性更大(表 1). 此外, 在实际应用中, 一方面要将敏感度高和敏感度不高的因子结合

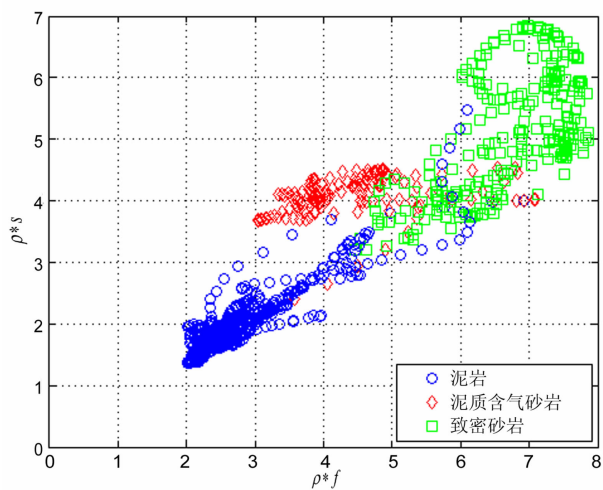


图 6 ρf 和 ρs 交会图($c=1.333$)

Fig. 6 A crossplot of ρf vs ρs ($c=1.333$)

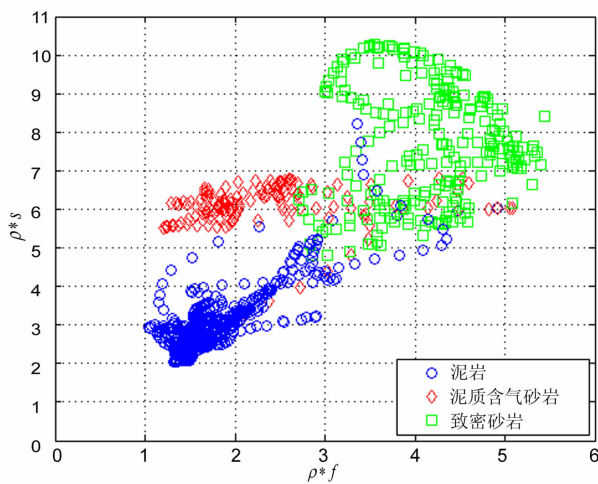


图 7 ρf 和 ρs 交会图($c=2.0$)

Fig. 7 A crossplot of ρf vs ρs ($c=2.0$)

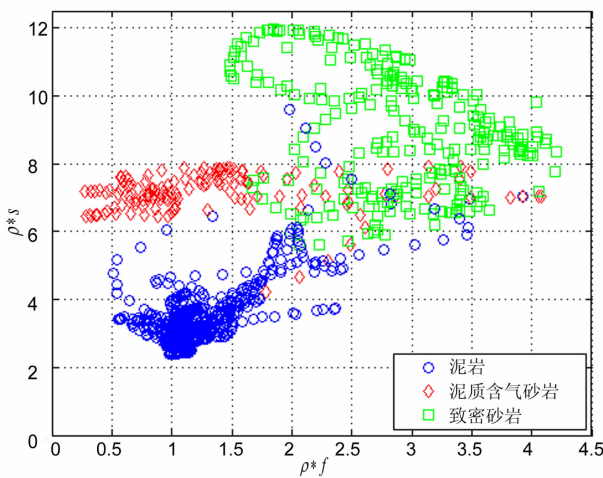


图 8 ρf 和 ρs 交会图($c=2.333$)

Fig. 8 A crossplot of ρf vs ρs ($c=2.333$)

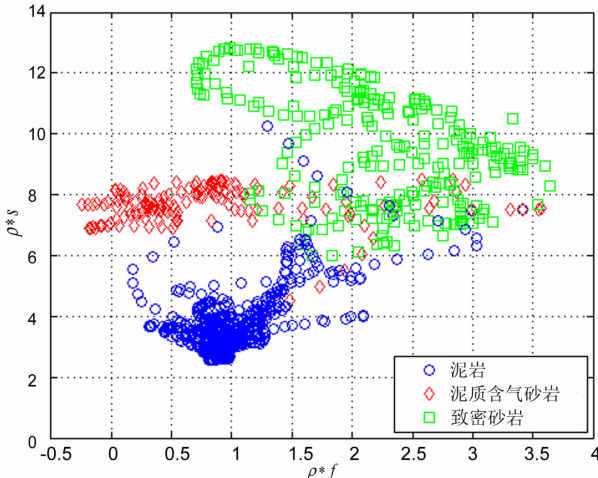


图 9 ρf 和 ρs 交会图($c=2.5$)

Fig. 9 A crossplot of ρf vs ρs ($c=2.5$)

起来分析,另一方面要尽可能降低计算过程中产生的误差,这样才能达到既预测岩性流体又降低噪音的效果。

4 结 语

通过对几种岩性流体预测因子的对比分析,可以得到以下几点结论和认识:

(1)岩性流体识别因子 σ 、 $\lambda\rho$ 和 ρf 对流体的敏感度不同,敏感度相对较高的是 ρf ,相对较低的是 σ 、 $\lambda\rho$ 处于中间。

(2) ρf 和 ρs 交会方法中 c 值通过测井数据获得比较可靠,一般在 1.333~2.5 之间。

(3)实际中应将敏感度高和敏感度不高的岩性流体因子结合起来综合分析。

(4)文中介绍的三种方法有助于提高对油藏岩性流体的认识,优化钻井方案,降低勘探开发风险。

参 考 文 献 (References):

[1] 张向林,陶果,刘新茹. 油气地球物理勘探技术进展[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):143~151.
Zhang X L, Tao G, Liu X R. Progress in oil geophysical exploration [J]. Progress in Geophysics,2006,21(1):143~151.

[2] 高建虎,雍学善,刘洪. 叠后地震油气检测技术与应用[J]. 石油物探,2006,45(4):385~389.
Gao J H, Yong X S, Liu H. Post-stack seismic hydrocarbon detection technology and application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(4):385~389.

[3] 杨占龙,彭立才,陈启林,等. 地震属性分析与岩性油气藏勘探[J]. 石油物探,2007,46(2):131~136.
Yang Z L, Peng L C, Chen Q L. Seismic attributes analysis and lithological reservoir exploration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007,46(2):131~136.

[4] 王西文. 岩性油气藏的储层预测及评价技术研究[J]. 石油物探,2004,43(6):511~517.
Wang X W. Some techniques of reservoir prediction and evaluation for lithologic deposits and their applications [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43(6):511~517.

[5] Goodway W, Chen T, Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters from P and S inversion[J]. Expanded Abstracts of 68th Annual Internat SEG Mtg, 1997, 183~186.

[6] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J, *et al.* Fluid property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective[J]. Geophysics, 2003, 68(1):29~39.

[7] Dillon L, Schwedersky G, Guilherme V, *et al.* A multiscale DHI elastic attributes evaluation [J]. The leading Edge, 2003, 22(10):1024~1029.

[8] 宁忠华,贺振华,黄德济. 基于地震资料的高灵敏度流体识别因子[J]. 石油物探,2006,45(3):239~241.
Ning Z H, He Z H, Huang D J. High sensitive fluid identifi-

cation based on seismic data [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(3):239~241.

[9] 王云专,杨立伟,李素华,剩余时差校正及泊松比反演[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):214~218.
WANG Y Z, YANG L W, Li S H. Residual moveout correction and Poisson's ratio inversion [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1):214~218.

[10] 姜秀娣,刘洋,魏修成,等. 一种同时反演纵波速度和泊松比的方法[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):314~318.
Jiang X D, Liu Y, Wei X C, *et al.* A P-wave velocity and poisson ratio nonlinear inversion method [J]. Progress in Geophysics, 2005,20(2):314~318.

[11] 苑书金,于常青. 地震弹性属性的解释和应用[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(4):234~238.
Yuan S J, Yu C Q. Interpretation and applications of seismic elastic attributes [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005,28(4):234~238.

[12] 李宗杰,王胜泉. 地震属性参数在塔河油田储层含油气性预测中的应用[J]. 石油物探,2004,43(5):453~457.
Li Z J, Wang S Q. Application of seismic attributes in the prediction of oil & gas potential in Tahe oil field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43(5):453~457.

[13] 李维新,史譔,王红,等. 岩石物理弹性参数规律研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(5):1380~1385.
LI W X, Shi G, Wang H, *et al.* The study on the relationships of elastic properties of rock physics [J]. Progress in Geophysics, 2007,22(5):1380~1385.

[14] 云美厚,易维启. 孔隙流体地震特性的计算[J]. 石油物探,2001,40(2):13~20.
Yun M H, Yi W Q. Computation of seismic properties of pore fluid [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2001, 40(2):13~20.

[15] Gray D, Veritas E A. The Application of AVO and Inversion to the Estimation of Rock Properties. SEG 2000 Expanded Abstracts.

[16] Anderson P F, Gray F D, Veritas D G C Inc. Using LMR for Dual Attribute Lithology Identification. G/San Antonio 2001 Expanded Abstracts.

[17] 陈习峰. 岩石孔隙流体交会技术最新进展[J]. 勘探地球物理进展,2004,27(6):397~401.
Chen X F. Advances in crossplot techniques of pore fluid parameters [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004,27(6):397~401.

[18] 马中高,伍向阳. 石油流体弹性参数的实验研究[J]. 石油物探,2007,46(1):94~99.
Ma Z G, Wu X Y. Experimental study on elastic properties of oil [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007,46(1):94~99.

[19] 甘利灯,赵邦六,杜文辉,等. 弹性阻抗在岩性与流体预测中的潜力分析[J]. 石油物探,2005,44(5):504~508.
Gan L D, Zhao B L, Du W H, *et al.* The potential analysis of elastic impedance in the lithology and fluid prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005,44(5):504~508.