

多参数交会流体识别方法及应用

江伟^{1,2}, 李录明¹, 赵俊省¹

(1. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川成都 610059; 2. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都 610081)

摘要: 利用测井资料或反演得到的岩性参数, 可以计算多种弹性参数及属性参数。理论上, 各种弹性或属性参数对识别流体有不同程度的效果, 即识别能力有差异。为选取对油气敏感性较好的参数, 可参照一种定量交会技术, 计算出流体识别系数, 利用计算得到的高流体识别系数, 优选出对油气敏感的参数, 最后用交会图法实现流体识别。利用 Castagna 和 Smith 模型及国内某油田实际资料对上述方法进行了分析和验证。

关键词: 交会图; 多参数; 流体识别; 流体识别系数

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

近几年, 随着多波多分量地震勘探技术和叠前地震反演技术的迅速发展, 地震资料不仅能提供纵波信息, 也能提供重要的横波信息, 这大大推动了储层流体识别技术的发展。在储层和流体解释方面, 交会图技术不仅可用于属性优化, 而且可以用于储层类型划分、储层测井评价及储层流体定性识别等。目前, 用于流体识别的参数较多, 且都有不同程度的识别效果, 在实际应用中, 如何选择合适的高敏感性参数仍缺乏理论指导, 大部分解释人员根据经验选择流体识别参数^[1]。针对较多参数, 如何选择敏感的流体识别参数, 是流体识别及储层预测的关键步骤之一。本文通过一种定量交会技术, 计算出弹性或属性参数的流体识别系数^[2,3], 根据流体识别系数对多

参数进行筛选后, 选择敏感性较好的参数用于识别流体, 尽量避免了低敏感性参数参与预测的多解性和不确定性。

1 弹性及属性参数计算方法^[4,5]

利用测井资料或反演得到的纵、横波速度及密度, 可计算多个弹性及属性参数(见表 1)。它们可分为两大类: 第一类是直接由岩石物理公式得到的参数(A01~A17); 第二类是带有调节系数的参数(A14~A18), 如弹性阻抗, 入射角为调节系数。其中弹性阻抗和由 Whitcombe 等(2002)^[6]提出的弹性阻抗梯度已有较多实际应用, 且取得一定识别效果, 所以被列为重点考虑的参数。

表 1 弹性及属性参数

参数名称	简记符号	参数名称	简记符号	参数名称	简记符号
纵波速度 v_p	A01	横波速度 v_s	A02	密度	A03
v_p/v_s	A04	泊松比	A05	纵波阻抗	A06
横波阻抗	A07	阻抗差	A08	阻抗比	A09
拉梅常数	A10	体积模量	A11	杨氏模量	A12
剪切模量	A13	拉梅常数-密度积	A14	泊松比与拉梅比	A15
泊松比-密度积	A16	弹性阻抗梯度	A17	弹性阻抗 $\theta=30^\circ$	A18

弹性阻抗理论是在 Aki-Richards 简化方程基础上, 通过一系列推导得出

$$I_{E(\theta)} = v_p^{1+\sin^2\theta} v_s^{-8k\sin^2\theta} \rho^{1-4k\sin^2\theta} \quad (1)$$

式中: v_p 为纵波速度, v_s 为横波速度, ρ 为储层密度, θ 为地震波入射角, k 通过下式求取。

$$k = \left[\left(\frac{v_s^i}{v_p^i} \right)^2 + \left(\frac{v_s^{i+1}}{v_p^{i+1}} \right)^2 \right] / 2 \quad (2)$$

式(2)中 v_s^i 为上层介质横波速度, v_s^{i+1} 为下层介质横波速度, v_p^i 为上层介质纵波速度, v_p^{i+1} 为下层介质纵波速度。

收稿日期: 2009-09-11; 改回日期: 2010-03-10。

第一作者简介: 江伟(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多波勘探、地震资料解释。

基金项目: 国家 863 项目(2007AA060505)资助。

对其进行归一化处理,得到新的弹性阻抗表达式

$$I_E(\theta) = \alpha_0 \beta_0 \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^a \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^c \right] \quad (3)$$

式中: α_0, β_0 和 ρ_0 为常数因子,分别代表 v_p, v_s 和 ρ 的平均值; α, β 和 ρ 分别为各个深度的 v_p^i, v_s^i, ρ^i , 且有

$$a = 1 + \sin^2 \theta, b = -8k \sin^2 \theta, c = 1 + 4k \sin^2 \theta \quad (4)$$

Whitcombe^[6]对方程(3)进行了修正,以 $\tan \chi$ 代替 $\sin^2 \theta$,并将原反射系数乘以一个因子 $\cos \chi$,得到扩展弹性阻抗表达式

$$I_{EE(\chi)} = \alpha_0 \rho_0 \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^p \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^q \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^r \right] \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} p &= \cos \chi + \sin \chi, q = -8k \sin \chi, \\ r &= \cos \chi - 4k \sin \chi \end{aligned} \quad (6)$$

弹性阻抗是入射角的函数,就绝对值而言,没有明确的物理含义,但弹性阻抗随入射角的变化率^[7]具有识别流体性质的能力。将弹性阻抗随入射角的变化率称为弹性阻抗梯度,通过研究弹性阻抗梯度,可进行油气识别。

2 交会图分析及流体识别系数计算

交会图法分一维、二维交会图法。为提高流体识别精度,可将二者交替使用,优选出高敏感参数。经计算得到的第二类参数(带调节系数),可通过改变调节系数直接用于流体识别(称为一维分析)。在二维交会图中,通常用目标储层(含气、含水、含油等)与背景层的分离程度来表示两参数对流体的敏感性。本文参考 Ebdon 以椭圆拟合为基础的定量交会图技术,利用流体识别系数(C_q)这一概念,表示对流体的可识别性。通过计算,选出高敏感性油气参数,用于二维交会。具体计算公式为

$$C_q = \frac{1}{\sum p_{i,j} / (NM)} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots$

式中: $p = 10g/G$, 为重叠率,主要描述两类储层在交会图内的分离程度, g 为目标层椭圆与背景层椭圆相交区域内的数据点数, G 为所有储层椭圆内总的的数据点数; N 为目标储层类型数; M 为背景层类型数。图 1 为 $g=0$ 和 $g=5$ 的两参数交会图,图 1a 中,可把黄色区域作为目标层,它与红色背景层没有相交区域,即 $g=0$; 而图 1b 中,两椭圆相交区域内有 5 个数据点,即 $g=5$ 。由图可见, p 越小, C_q 越大,对流体识别的能力越强。

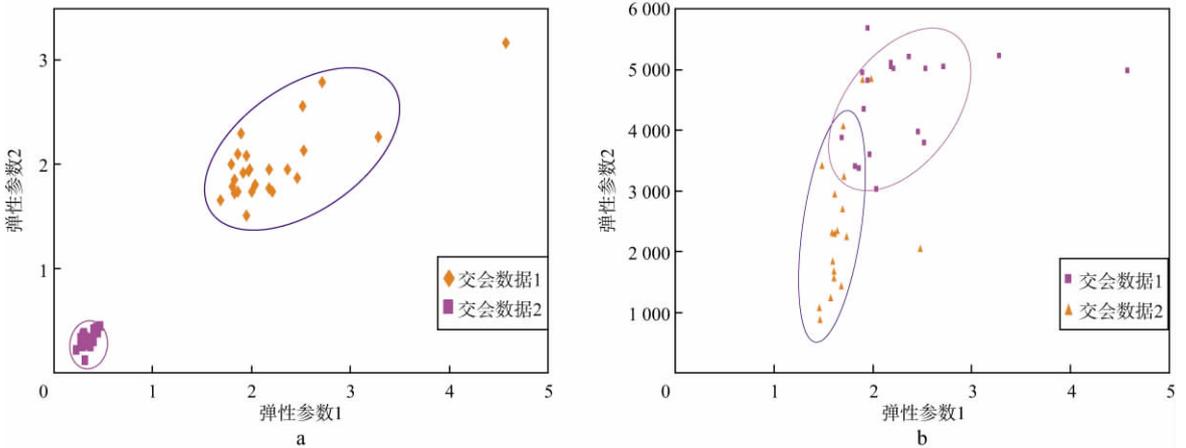


图 1 $g=0$ 两参数交会分析(a)和 $g=5$ 两参数交会分析(b)

3 Castagna 和 Smith 含油气砂岩识别^[8]

根据 Castagna 和 Smith^[8] 在全球范围测量的

25 个数据集(泥岩、含气砂岩和含水砂岩的 P 波速度、S 波速度和密度),提取 19 个样本(表 2),利用储层资料计算各弹性参数;然后计算出目标层(气层)的 C_q 值,选出 C_q 较高的参数(表 3);对比 C_q 值高低,用交会图法进行分析、验证,实现流体识别。

表2 Castagna 和 Smith 含油气砂岩模型

层数	水层			泥岩			气层		
	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
1	3 050	1 560	2.40	2 770	1 270	2.45	2 690	1 590	2.25
2	3 420	1 780	2.53	2 770	1 450	2.67	3 390	1 790	2.50
3	2 520	900	2.11	2 310	850	2.18	1 580	940	1.94
4	3 440	1 940	2.52	2 750	1 260	2.43	3 190	1 980	2.45
5	3 550	1 540	2.38	3 510	1 850	2.46	3 470	1 750	2.21
6	5 030	3 320	2.61	3 600	1 850	2.63	4 910	3 300	2.59
7	2 070	810	2.10	1 940	770	2.10	1 540	980	2.05
8	2 690	1 380	2.13	2 670	1 130	2.29	2 070	1 290	2.10
9	2 190	1 210	2.15	2 100	1 030	2.10	1 680	1 150	2.10
10	2 520	1 200	2.24	2 590	1 390	2.30	1 860	1 160	2.09
11	3 810	2 300	2.25	3 810	2 260	2.40	3 450	2 020	2.10
12	2 660	1 250	2.23	2 380	940	2.27	2 250	1 300	2.06
13	2 840	1 470	2.08	2 740	1 390	2.06	2 840	1 760	2.08
14	2 130	670	1.90	1 830	400	2.02	1 440	580	1.53
15	3 050	1 460	2.30	3 350	1 720	2.36	2 180	1 370	2.19
16	3 460	1 850	2.26	2 310	940	1.90	3 040	1 920	2.09
17	2 110	930	2.11	2 100	640	2.14	1 420	970	1.97
18	3 210	1 850	2.17	2 870	1 300	2.27	2 930	1 790	1.96
19	3 280	1 680	2.19	3 270	1 650	2.20	3 040	1 740	2.05

表3 4种优选参数交会 C_q 值(目标层为气层)

C_q	纵横波速比	横波阻抗	弹性阻抗	弹性阻抗梯度
纵横波速比	0	1.21	1.31	1.72
横波阻抗	1.21	0	2.87	1.62
弹性阻抗	1.31	2.87	0	0.91
弹性阻抗梯度	1.72	1.62	0.91	0

1) 一维参数分析^[9]。

用交会图法表示各储层弹性阻抗随入射角的变化,如图2所示。其中横坐标表示入射角变化情况,纵坐标为弹性阻抗值,蓝色实线为泥岩,绿色虚线为水层,红色虚线为气层。

图3是入射角为 $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时弹性阻抗在各储层的变化曲线,其中横坐标表示层数,纵坐标为弹性阻抗值,蓝色实线为泥岩,红色虚线为水层,浅蓝色虚线为气层。

由图2和图3可见,在地震波入射角变化过程中,泥岩弹性阻抗基本大于水层,气层弹性阻抗最小,入射角为 30° (图3c)时,弹性阻抗在3个层中差值较大。另外,三者弹性阻抗均为负梯度,气层的弹性阻抗梯度最大。这些特征可作为识别储层的依据。

2) 二维参数交会。

图4和图5分别为选择较低和较高流体识别系

数 C_q 所做的二维参数交会分析,横、纵坐标分别表示交会参数值,交会数据点值用不同图案、颜色区分。

由图4和图5可见,低 C_q 值参数交会时,数据点分离程度不高,识别效果较差;高 C_q 值参数交会时,数据点分离程度较高,识别效果较好。

从一维和二维参数交会图分析可知:

1) 气层对弹性阻抗较敏感,泥岩弹性阻抗基本大于水层弹性阻抗,气层弹性阻抗最小,但气层弹性阻抗梯度最大。

2) 在地震波入射角大于 30° 且小于 45° 的情况下,弹性阻抗对水层、泥岩、气层识别效果都较好。

3) 在二维参数交会图中,经定量交会技术计算后优选的参数,对储层识别效果较好。其中弹性阻抗梯度与泊松比交会对气层识别效果较好;横波阻抗与弹性阻抗梯度交会及弹性阻抗与波速比交会对泥岩识别效果较好;在入射角为 30° 时,弹性阻抗与横波阻抗交会对三者识别效果最佳。

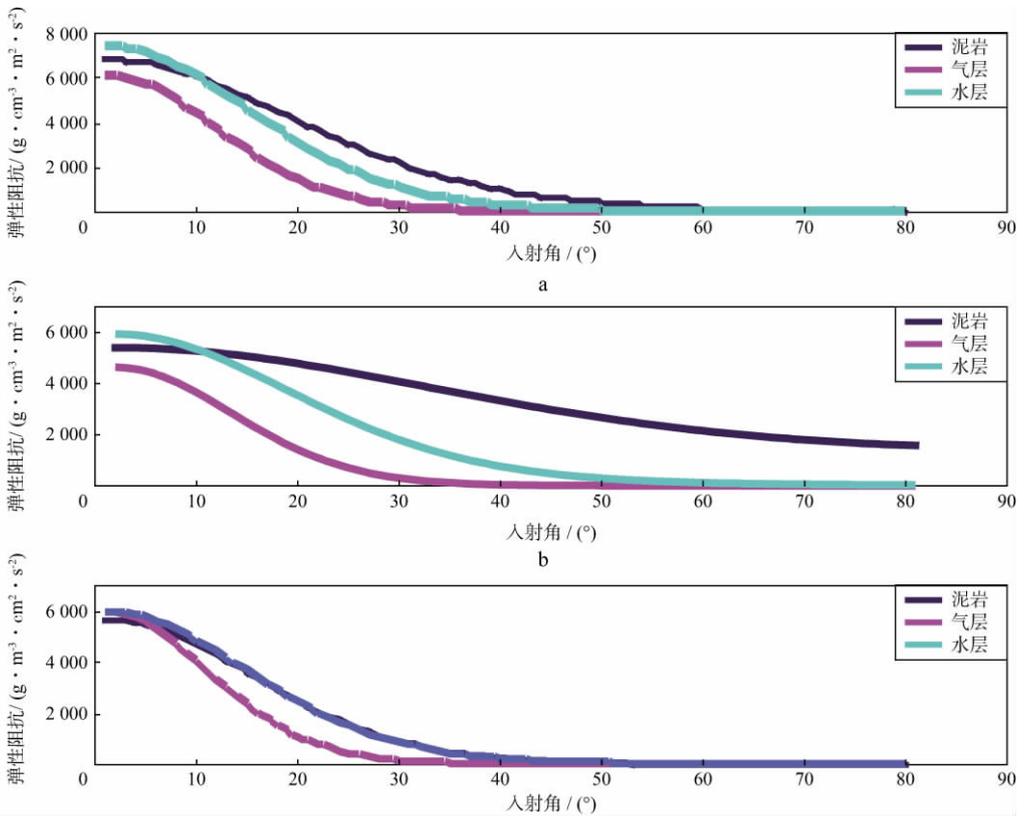


图 2 弹性阻抗在第 1(a)、第 5(b)、第 12(c)层中随入射角变化的情况

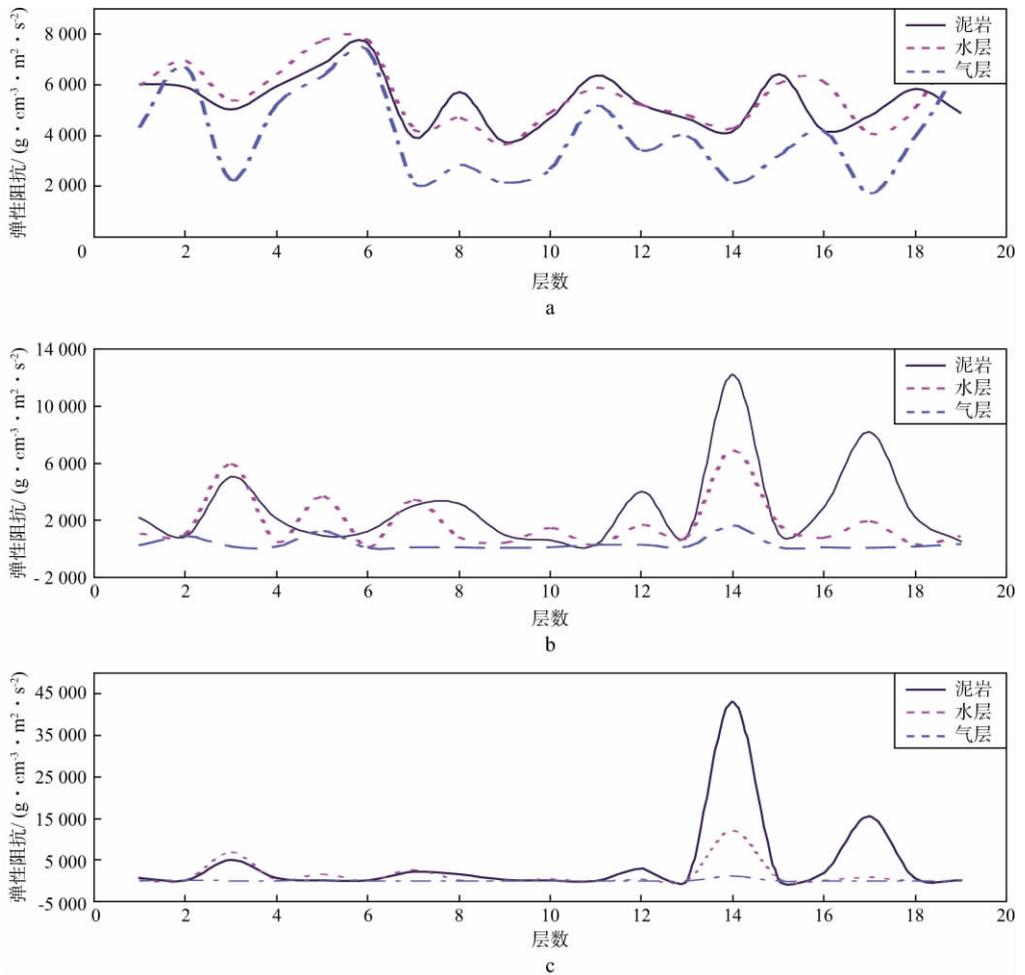


图 3 入射角为 10°(a)、30°(b)、45°(c)时弹性阻抗在各储层的变化曲线

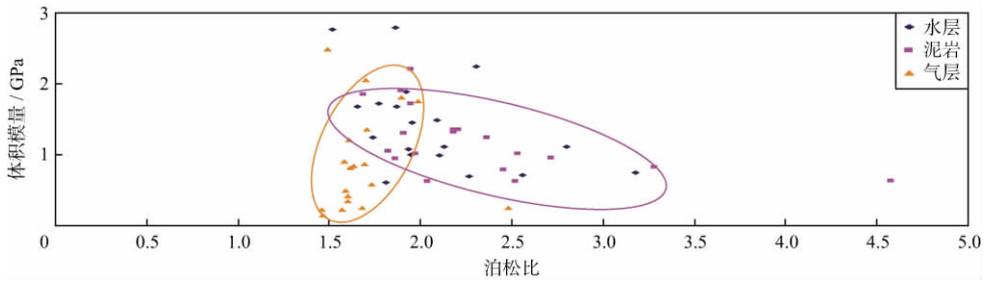


图 4 C_q 值较低的两参数(体积模量和泊松比, $C_q=0.73$)交会

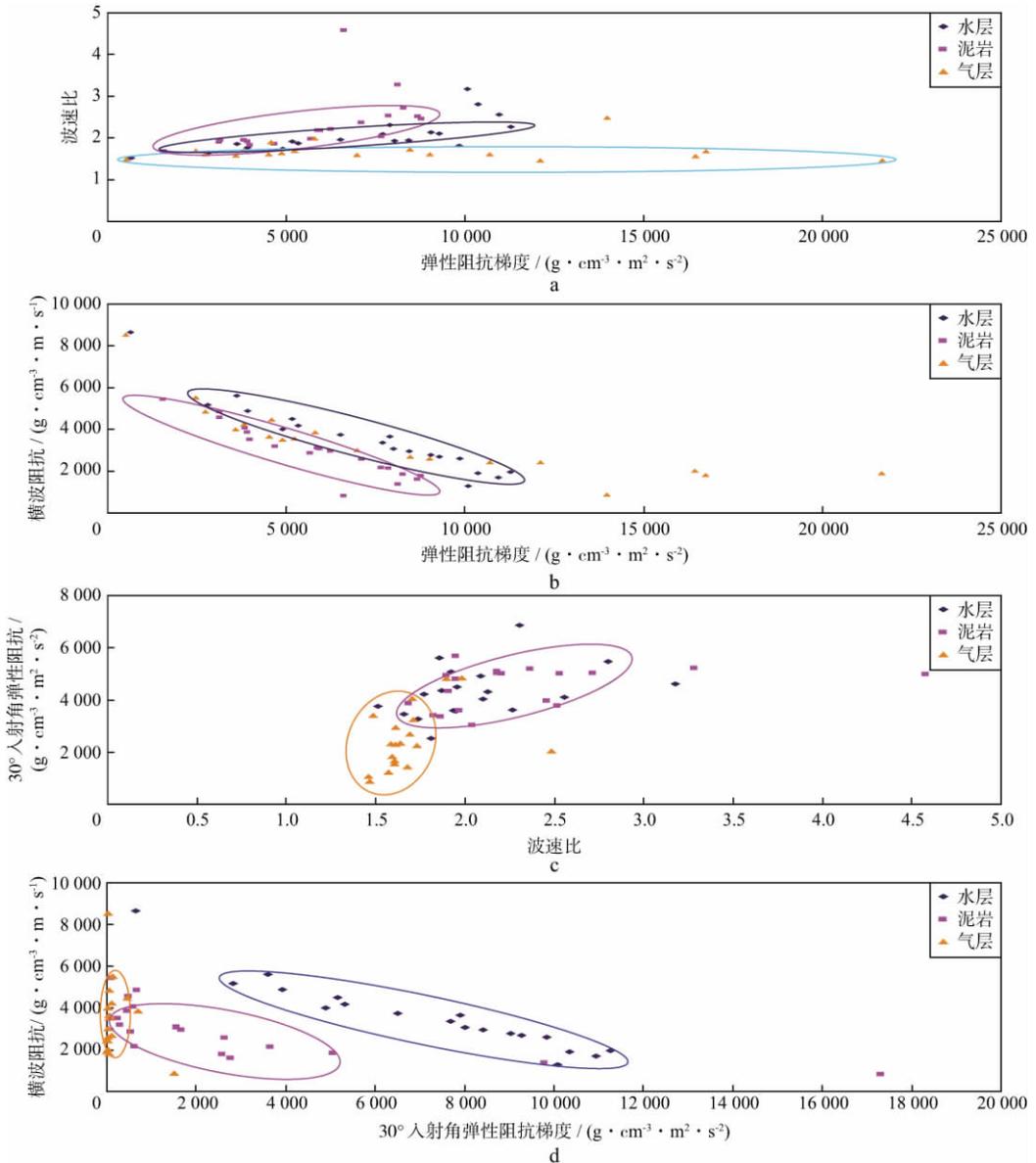


图 5 优选 C_q 二维参数交会

a $C_q=1.72$; b $C_q=1.62$; c $C_q=1.31$; d $C_q=2.87$

4 实际应用效果

根据国内某油田的测井数据,选用如表 4 所示的储层模型^[10],进行流体识别应用。

首先进行一维分析。图 6a 为入射角 30° 时,弹性阻抗在各储层中变化的情况,图 6b 为入射角

45° 时,弹性阻抗在各储层中变化的情况。其中,横坐标为储层层数,纵坐标为弹性阻抗值,蓝色虚线为水层,红色虚线为气层,黄色实线为油层。

图 7 为弹性阻抗在第 5 层和第 7 层中的变化情况,其中横坐标为入射角,纵坐标为弹性阻抗值,蓝色虚线为水层,红色虚线为气层,黄色实线为油层。

表 4 国内某油田测井储层模型

样本	水层			气层			油层		
	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
1	2 562	1 231	2.18	2 463	1 186	2.18	2 806	1 588	2.20
2	2 531	1 207	2.14	2 346	1 275	2.13	2 709	1 363	2.12
3	2 560	1 363	2.14	2 758	1 404	2.23	2 582	1 361	2.10
4	2 629	1 461	2.15	2 651	1 262	2.12	2 581	1 205	2.10
5	2 610	1 392	2.09	2 776	1 345	2.25	2 711	1 117	1.90
6	2 764	1 499	2.13	2 566	1 340	2.19	2 422	1 287	2.14
7	2 645	1 407	2.23	2 578	1 380	2.17	2 682	1 237	2.10
8	2 714	1 472	2.17	2 485	1 407	2.144	2 629	1 397	2.12
9	2 860	1 575	2.16	2 665	1 369	2.18	2 469	1 347	2.10
10	3 006	1 602	2.22	2 880	1 569	2.32	2 793	1 453	2.29

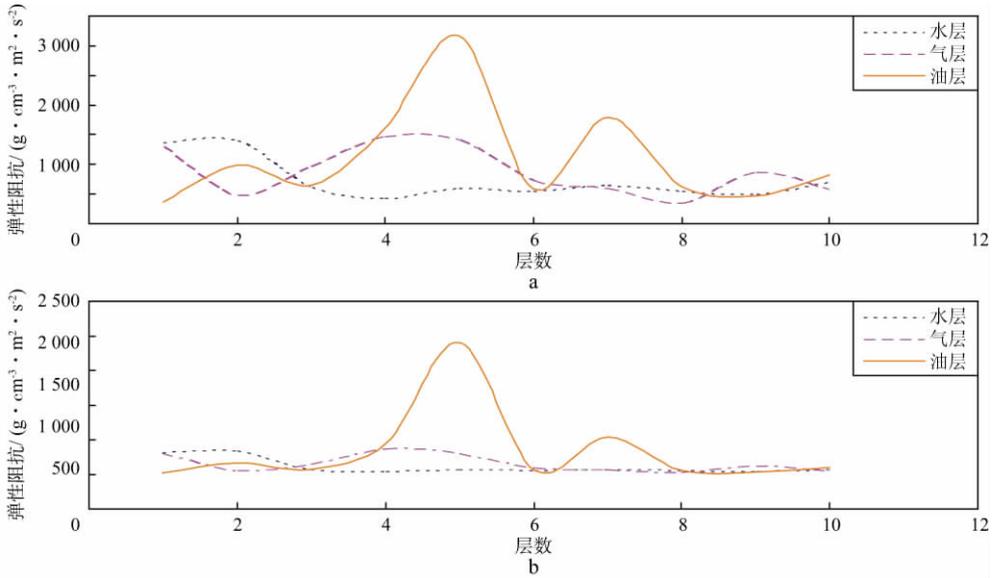


图 6 入射角为 30°(a)和 45°(b)时弹性阻抗在各储层中的变化

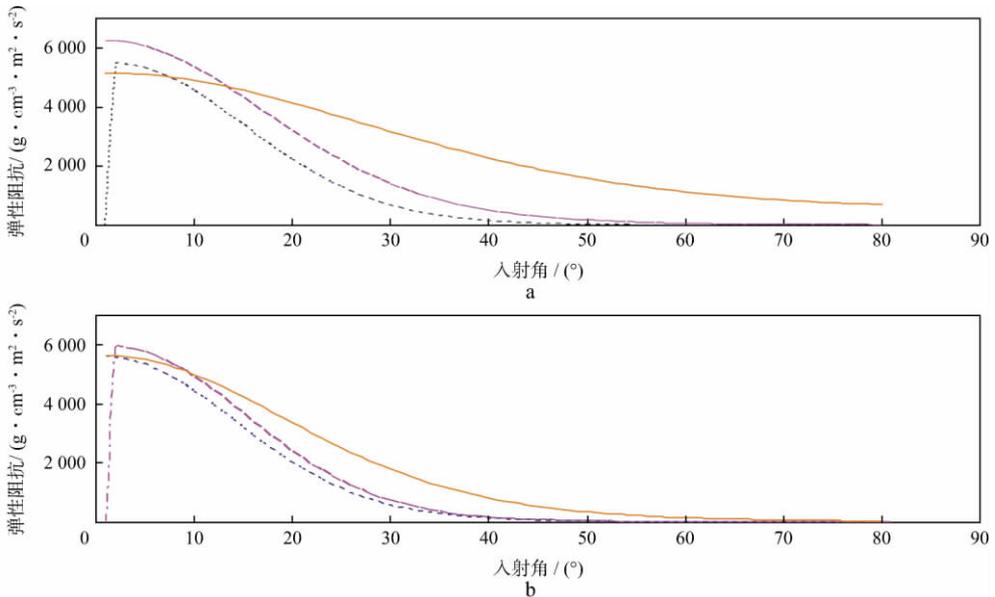


图 7 弹性阻抗在第 5 层(a)和第 7 层(b)中随入射角的变化

由图可见,在地震波入射角变化过程中,油层弹性阻抗基本大于气层,水层弹性阻抗最小,油层弹性阻抗梯度最小。

在二维参数交会(图 8)中,计算了目标层流体识别系数, C_q 值最低($C_q = 0.73$)的是剪切模量与波阻抗差交会; C_q 值较高($C_q = 1.73$)的是横波阻

抗与弹性阻抗梯度交会; C_q 值最高 ($C_q=2.9$) 的是横波阻抗与入射角为 50° 的弹性阻抗交会。由图 8

可见, 经计算得到的高 C_q 值参数组合, 分离程度较好, 对该地区储层流体有一定识别能力。

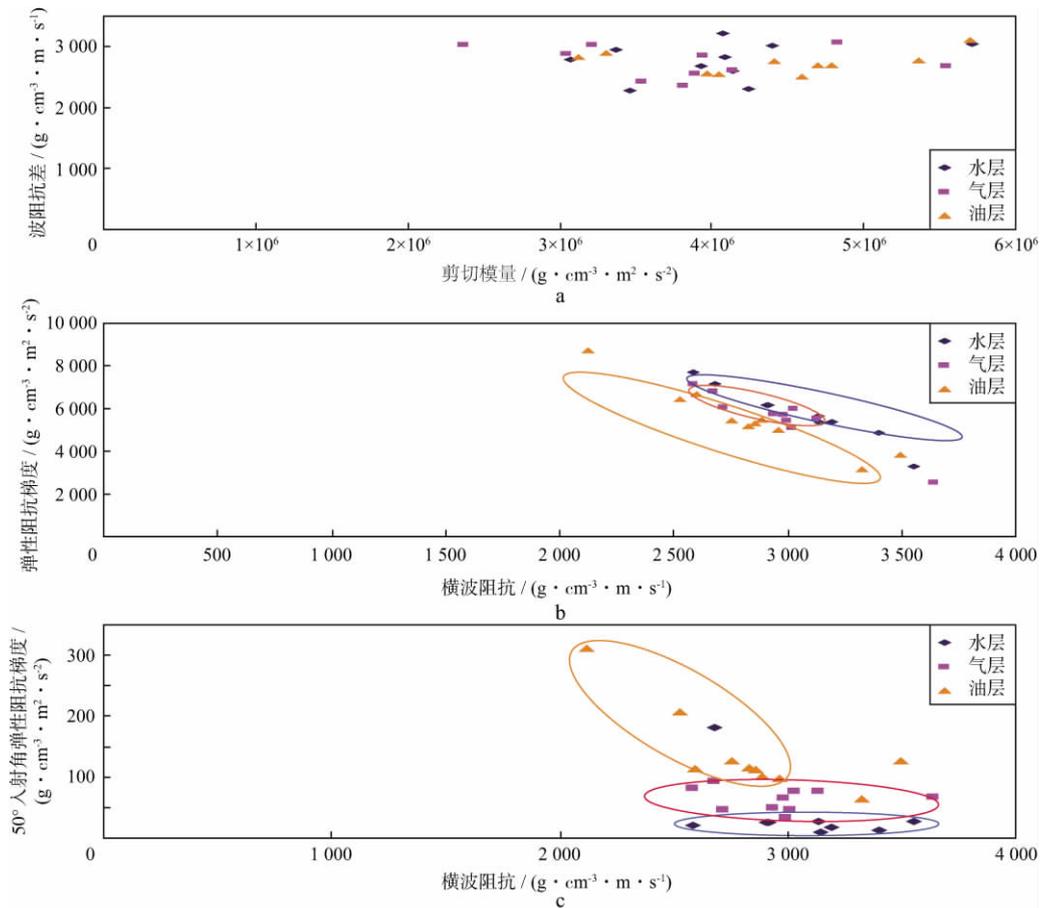


图 8 二维参数交会

a $C_q=0.73$; b $C_q=1.73$; c $C_q=2.9$

5 结束语

1) 在一维、二维参数交会分析中, 高流体识别系数的参数对储层的识别能力明显高于低流体识别系数的参数, 因此, 有必要首先计算参数的流体识别系数, 提高多参数流体识别的效率, 避免低敏感性参数参与预测的多解性和不确定性。

2) 利用 Castagna、Smith 模型及国内油田模型得到的流体识别系数及敏感性参数, 交会结果不尽相同, 因此, 在新区开展参数交会储层预测研究时, 需要由已知资料分析参数交会变化规律。

3) 在一维、二维参数交会的基础上, 利用 Castagna、Smith 模型多参数分析的规律在国内某油田的流体识别中取得了一定效果。以上规律应用于其余地区未知层反演, 可以预测储层。

参考文献

1 韩济全. 用孔隙度与含水饱和度交会图识别储层流体性质[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(4): 293~296

2 Ebdon D. Statistics in geography: a practical approach [M]. Oxford: Basil Blackwell, 1997. 1~240

3 Dey A K, Rai C. Quantifying uncertainties in AVO forward modeling[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1 849~1 855

4 John P C, Herbert W S. Principles of AVO crossplotting[J]. The Leading Edge, 1997, 16(4): 337~344

5 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

6 Whitcombe D N, Connolly P A, Reagan R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 63~67

7 彭真明, 李亚林, 梁波, 等. 叠前弹性阻抗在储层气水识别中的应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 43~52

8 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. PP波 AVO 多属性交会图分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 44~47

9 John P C, Steven W S. Comparison of AVO indicators: a modeling study[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1 849~1 855

10 王秀玲. 胜利油田垦 71 地区多分量地震资料解释方法研究与应用[R]. 山东东营: 胜利油田物探研究院, 2008. 12~15

(编辑: 戴春秋)