

文章编号: 1000 0747(2006) 05 0558 04

AVO 流体反演理论与实践

高建荣¹, 滕吉文², 李明³, 张云绵³

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所; 3. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 中国石油“全国石油预探区带综合评价与战略方向研究”(0301101)

摘要: AVO 流体反演技术能够定量地确定储集层含各种流体的可能性。首先利用测井曲线建立 Monte Carlo 随机正演模型, 然后通过 Biot Gassman 流体替换理论获得模型中流体分别为油、气、水时的合成记录, 利用 Shuey 公式得到相应的截距和梯度, 将实际地震数据所得到的截距和梯度与模型所产生的截距和梯度进行对比, 再利用 Bayes 理论即可定量求得所含油、气、水的可能性。当储集层中含有油、气、水中的二相或三相时, 可能性分布图重叠, 预测的可能性值比只含单相流体时有所降低, 但是预测的准确性仍然比较高。将这项技术应用于川中天然气勘探, 取得了较好的应用效果。图 8 参 8

关键词: AVO; 流体反演; Monte Carlo; Biot Gassman; Shuey 公式; Bayes 理论

中图分类号: TE132.1 文献标识码: A

AVO fluid inversion: theory and practice

GAO Jian rong¹, TENG Ji wen², LI Ming³, ZHANG Yun mian³

(1. College of Geo Exploration Science & Technology, Jilin University, Jilin 130026, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China; 3. Research

Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: AVO fluid inversion can quantitatively determine the probability distribution of fluids in a reservoir. Procedures are as follows: establish a Monte Carlo simulation model from logging curves, get the synthetic data using Biot Gassman theory as the fluids are oil, gas and water in the model, get intercept and gradient using Shuey's function, compare the intercept and gradient values from the seismic data with the model values, and finally determine the probability of each fluid using Bayesian theory. Compared to the one phase fluid, when the fluid is composed of two or three phases, the predicted value is low owing to the overlapping of the probability distribution graph, but its precision is still high. The technology was successfully applied in the middle Sichuan Province.

Key words: AVO; fluid inversion; Monte Carlo; Biot Gassman; Shuey's function; Bayesian theory

长期以来, 从地震 AVO 信息中获取流体相关信息是地球物理学界关注的焦点。文献[1]提出波长(λ)—剪切模量(μ)—密度(ρ)技术, 文献[2]基于 Murphy 等的工作提出了孔隙模量方法, 文献[3]介绍了流体区分的概念, 文献[4]利用 AVO 理论中的 Biot Gassman 理论来区分流体属性^[4]。本文所讨论的 AVO 流体反演技术直接针对流体属性, 它是 AVO 技术的一种延伸, 能够定量地确定地层含各种流体的可能性。

1 AVO 流体反演理论

1.1 随机正演 AVO 模型

常规 AVO 模型的建立较为复杂, 为简捷起见, 建立如图 1 所示的 Monte Calo 随机正演模型, 表征泥岩的指标有纵、横波速度和密度, 泥岩的密度可以用一个平均值和变化范围来指定(见图 2), 每个参数都遵循如图 2 所示的分布规律。

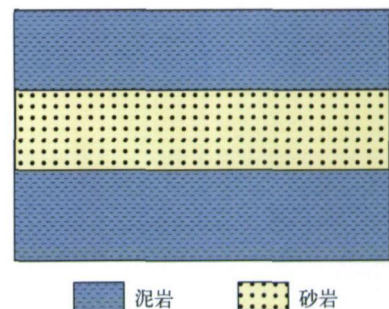


图 1 Monte Calo 随机正演模型

砂岩可以用以下指标来表征: 盐水模数、盐水密度、气模数、气密度、油模数、油密度、基质模数、基质密度、干燥岩石的模数、渗透率、孔隙度、页岩模数、水饱和度及厚度, 其中绝大部分参数的值都可由测井曲线得出一个平均值和一个变化范围, 形成类似图 2 的分

布区间图。

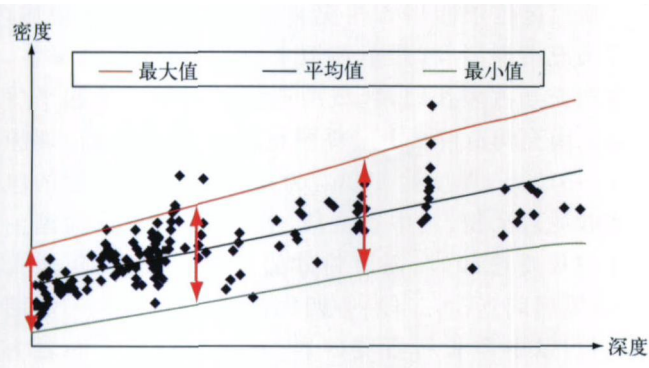


图2 泥岩密度分布图

指定目标层深度(该深度经测试已知其含油气性),即利用某井的测井曲线和油气显示情况来建立一个 Monte Calo 模型,泥岩的纵波速度和密度由测井曲线求得,横波速度可由 Castagna 等式计算得出;砂岩的盐水模数、盐水密度、气模数、气密度、油模数、油密度、基质模数、干燥岩石的模数和孔隙度参数等都可由测井曲线计算求得,页岩模数、渗透率和厚度均由岩石物理学定义为均匀分布。模型建立完毕后,便可得出相应的合成记录。

1.2 AVO 截距和梯度^[5,6]

AVO 理论的基础是:当入射角为零时,只有反射纵波;当入射角不为零时,则会产生反射纵波、反射横波、透射纵波、透射横波,其振幅与入射角的关系可用 Zoeppritz 方程来描述。在特定的假设条件和物理参数条件下,Shuey 等将方程简化为:

$$R(\alpha) = I + G\sin^2\alpha \quad (1)$$

式中 α ——入射角($^\circ$); R ——反射系数,无因次; I ——AVO 截距,即零炮检距处的反射系数,无因次; G ——AVO 斜率,即振幅随入射角变化的比例系数,无因次。

当砂岩中含有不同流体时,所获得的 AVO 截距和梯度也不同,可根据 AVO 模型的流体替换理论确定其截距和梯度。

1.3 AVO 模型的流体替换理论

首先根据储集层岩石的矿物成分和所含流体饱和度不同,计算纵、横波速度和密度变化情况;然后用不同流体饱和度替换结果合成 AVO 道集模型,并对道集模型进行 AVO 分析处理,总结出不同流体饱和度情况下的地震响应特征;再将分析结果与实际井旁道地震资料对比,从而建立可靠的储集层性质与地震响应特征的对应关系,为从地震资料中提取储集层流体属性信息提供依据。本文采用 Biot Gassman 流体替换模型,该模型的假设条件为:①横波模量不受所含孔隙流

体的影响;②储集层孔隙形状为球形;③速度不随频率的变化而变化;④岩石骨架和流体之间存在差异运动。

利用 Biot Gassman 流体替换模型,分别求得模型对含油砂岩、含气砂岩和含水砂岩的对应响应,对以上过程进行多次重复,即获得了多个点的截距-梯度交汇图。由图 3 可见,当砂岩中分别含有油、气、水时,它们在截距-梯度交汇图上分别处在不同的位置。黑色的点为 xi51 井井旁实际地震数据的投影,黑点主要分布在黄色点区域,说明该层为含气层。常规的 AVO 处理到此就基本结束了,但是,含气的可能性究竟有多大,这就需要 Bayes 理论来继续探讨。

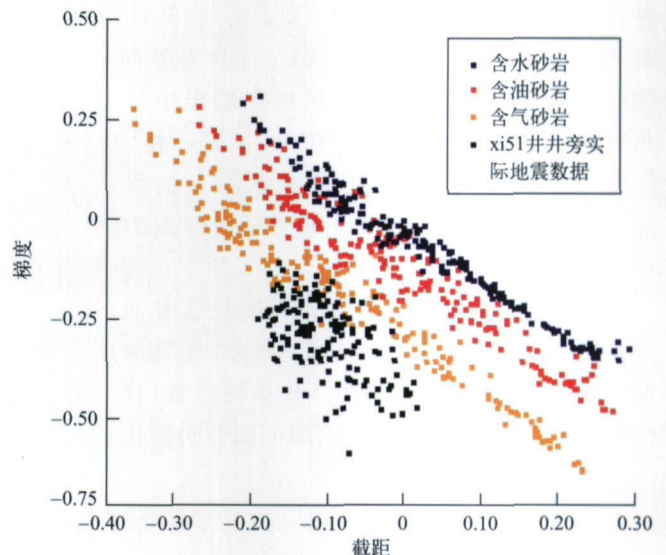


图3 截距-梯度交汇图

1.4 Bayes 理论^[7,8]

根据某个指定的随机试验前的信息,知道在两两互斥的有限多个(n 个)事件 A_1, A_2, \dots, A_n 中恰好有 1 个出现及每个 A_i 出现的概率,称之为验前概率。经过这个试验,得到的结果属于一个随机事件 B ,即做完这个试验后,知道事件 B 出现,希望结合这个试验结果来进一步确定每个 A_i 出现的概率,则称之为验后概率。验前概率的数学表达式为 $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$, 验后概率的数学表达式为 $P(A_1|B), P(A_2|B), \dots, P(A_n|B)$ 。

按假定, A_1, A_2, \dots, A_n 两两互斥且 $A_1 + A_2 + \dots + A_n = U$, 由全概率公式有:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i) \quad (2)$$

由概率乘法定理有:

$$P(A_i|B)P(B) = P(B|A_i)P(A_i) \quad (3)$$

因此,验后概率为:

$$\begin{aligned}
 P(A_i | B) &= \frac{P(B | A_i)P(A_i)}{P(B)} \\
 &= \frac{P(B | A_i)P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(B | A_i)P(A_i)} \quad (4)
 \end{aligned}$$

利用 Bayes 验后概率公式来计算截距 梯度交汇图上任一点属于油、气、水的可能性, 公式如下:

$$P(F | I, G) = \frac{P(I, G | F)P(F)}{\sum_k P(I, G | F_k)P(F_k)} \quad (5)$$

式中 $P(F | I, G)$ ——截距 梯度交汇图上的点属于某种流体类型的可能性; $P(I, G | F)$ ——某种流体在截距 梯度图上的分布密度; $P(F)$ ——含有某种流体的可能性; $P(I, G | F_k)$ ——从随机模拟输出中计算出的分布密度; $P(F_k)$ ——含油、气、水中某一相的可能性; F ——真实地震数据在截距 梯度图上的样点; k ——油、气、水中的某一相; F_k ——由模型得到的某一流体在截距 梯度图上的样点。

在储集层预测中, 若储集层中只含有油、气、水中的某一相, 随机模拟分布如图 4 所示; 当储集层中含有油、气、水中的二相或三相时, 分布图重叠, 预测的可能性值降低(见图 5), 但是预测的准确性仍然比较高。

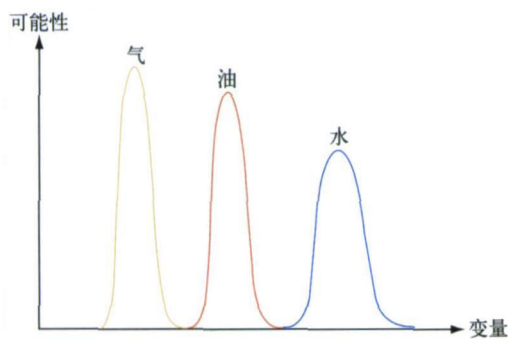


图 4 只含油、气、水中的一相时的可能性分布

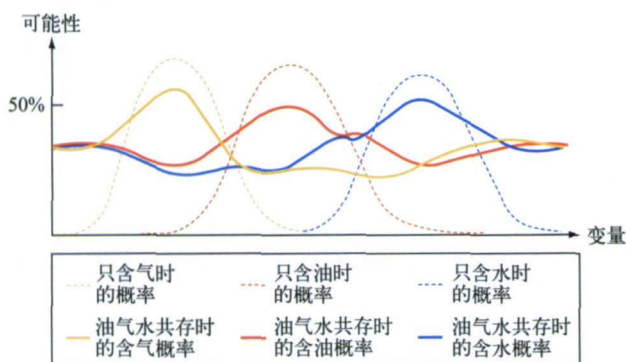


图 5 油、气、水共存时的可能性分布

2 应用实例

研究区位于四川省西充县至南充市顺庆区境内, 东起南充市荆溪乡, 西至莲池乡, 南起南充市新复乡, 北抵西充县占多扶镇。区域构造上属川中古隆起平缓构造区南充构造群。上三叠统香溪群(须家河组)埋深 2100~3100m, 厚度约 800m, 为一套河、湖相交替的厚层状砂泥岩沉积, 其中香一段、香三段、香五段为湖泊沼泽相灰质粉砂岩、泥质粉砂岩及黑色页岩、灰质页岩、薄煤层间互; 香二段、香四段、香六段为河流—滨湖相沉积, 以中粒长石石英砂岩、岩屑长石石英砂岩为主, 间夹薄层页岩或泥质粉砂岩。

本试验选取香四段的层位切片, 叠前数据有多处 AVO 异常(振幅随偏移距的增大而增大)。图 6 为同一层位的近角度叠加剖面 and 远角度叠加剖面的水平时间切片, 可以看出远角度叠加后的层位振幅更强。这种现象属于常规 AVO 异常。但是, 利用 AVO 异常判断储集层是否含气则不一定正确, 如 xi51 井, 井周围没有 AVO 异常, 但实际该井日产气 8470m³, 凝析油 0.5t。用 xi51 井的测井曲线建立 Monte Calo 随机正演模型, 用 Biot Gassman 流体替换理论得到含有油、气、水时的合成记录(见图 3), 利用 Bayes 理论得到该工区在某一个层位上油、气、水的可能性分布(见图 7)。图 7a 为某层段含油、气、水的可能性分布图, 该区主要是黄色, 几乎没有蓝色和红色, 说明该区主要含气。图 7b 为某层段含油气的可能性分布图, 图中红、黄色较多, 说明含油、气的可能性较大。图 8a 为某层段含气的

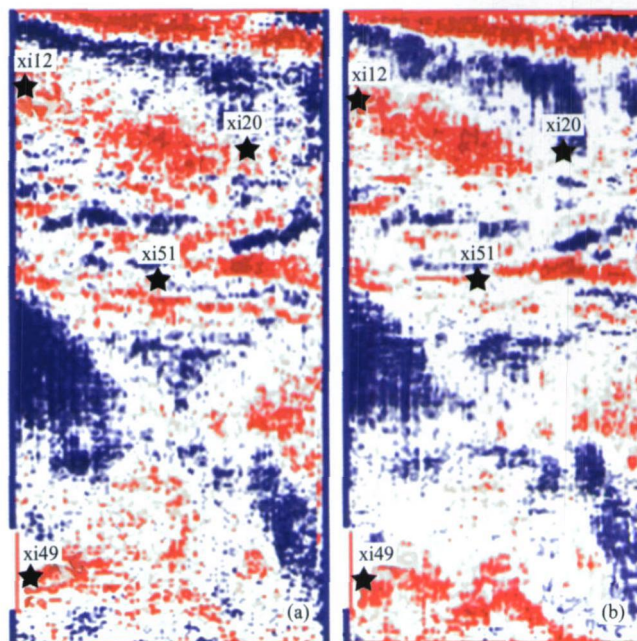


图 6 近偏移距(a)和远偏移距(b)叠加后的水平时间切片

可能性分布图,可见含气可能性大于 0.475 的区域主要集中在该区的南北两端,中西部也有一部分。由于 Bayes 理论在分布重叠时预测的可能性值偏低(预测的准确性不变),所以实际的含气可能性要大于 0.475。图 8b 是某层段含油的可能性分布图,由图知含油的可能性很小,xi12、xi49、xi20 井的钻探结果证实该区香四段主要含气。其中,xi12 井在香四段测试获 0.6093 万 m^3/d 的工业气流。

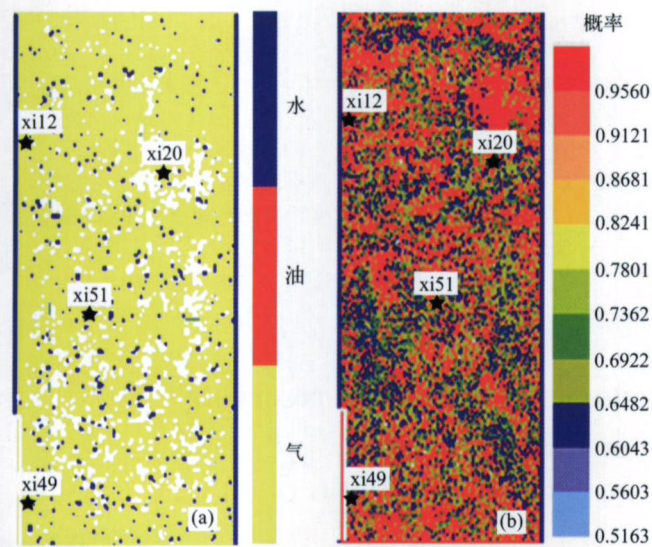


图 7 含油、气、水 (a) 和含油、气 (b) 可能性分布图

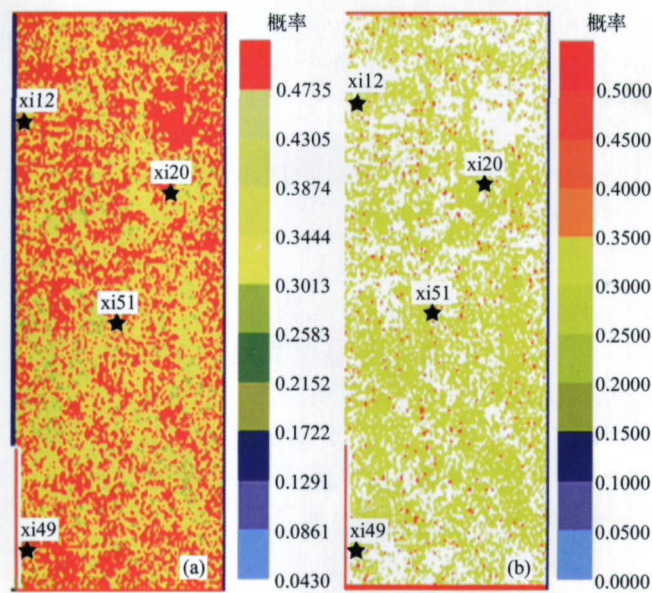


图 8 含气(a)和含油(b)的可能性分布图

3 结语

通过对测井曲线进行分析,可以得到储集层参数的可能性分布,由此可建立储集层模型,计算储集层在含不同属性流体时的一系列 AVO 响应,这样利用 Bayes 理论便可获得不同属性流体的可能性分布图。该方法在川中香溪群香四段的含油气性预测中获得了较好效果。

参考文献:

- [1] Satinder Chopra, Doug Pruden. Multiattribute seismic analysis on AVO derived parameters: a case study [J]. The Leading Edge, 2003, 22(10): 998-1002.
- [2] Mohamed A Eissa, John P Castagna. 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.
- [3] Dan Hampson. AVO inversion theory and practice [J]. The Leading Edge, 1991, 10(6): 39-42.
- [4] Brian H Russell, Ken Hedlin, Fred J Hilterman. Fluid property discrimination with AVO: A Biot Gassman perspective [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 29-39.
- [5] Alberto Malinverno, Victoria A Briggs. Expanded uncertainty quantification in inverse problems: Hierarchical Bayes and empirical Bayes [J]. Geophysics, 2004, 69(4): 1005-1016.
- [6] 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 Xiao dong. The application and approximation expression of Zoeppritz's equation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1991, 26(2): 129-144.)
- [7] 李邗, 何诚. AVO 物理解释和岩性识别 [J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(2): 145-148. (LI Han, HE Cheng. AVO processing, interpretation and lithology identification [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 25(2): 145-148.)
- [8] Michael Riedel, Stan E Dosso, Laurens Beran. Uncertainty estimation for amplitude variation with offset (AVO) inversion [J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1485-1496.

第一作者简介:高建荣(1979),男,陕西咸阳人,吉林大学博士研究生,主要从事石油地震勘探方面的研究工作。地址:吉林省长春市西民大街6号,吉林大学地球探测科学与技术学院,邮政编码:130026。E-mail: gaojianrong888@sina.com

收稿日期:2006-02-22 修回日期:2006-06-27

(编辑 黄昌武 绘图 李秀贤)