

基于录井资料的储层流体性质识别新方法

——以川西地区须家河组储层为例

魏阳庆¹ 魏飞龙² 何昊阳³ 刘锋⁴ 姜钧⁵

1. 中国石油川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院 2. 西南石油大学石油工程学院

3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 4. 中国石化中原油田测井公司 5. 中国石化中原油田技术监测中心

魏阳庆等. 基于录井资料的储层流体性质识别新方法——以川西地区须家河组储层为例. 天然气工业, 2013, 33(7): 43-46.

摘要 传统录井资料解释技术在成因机理、检测精度、解释模型等方面缺乏相应的理论指导, 因此没有可靠的评价模型与评价标准, 从而造成录井资料解释可靠性差的结果。针对目前勘探开发目标多样化的发展趋势, 以及各类复杂油气藏、深层油气藏、薄互层、非常规油气资源的钻探现状, 基于数理统计技术, 以录井色谱分析的天然气组分数据为基础数据集, 根据变量空间中欧氏距离与马氏距离对多元变量相互之间影响的不同反应能力, 分析了采用不同空间距离算法的流体识别模型在识别气层与水层方面的不同能力, 所构建的判别模型在四川盆地川西地区上三叠统须家河组气藏进行了应用, 模型预测准确率在 83% 以上。进而结合识别模型自身的特点, 进一步提出了一个优化模型, 与欧氏模型、马氏模型相比较, 对储层流体性质的识别能力得到进一步提高, 预测准确率为 97.22%。同时对传统的气测解释技术也提出了一个基于严格数学意义上的评价方法, 并对新建识别模型和传统模型进行了对比分析。

关键词 录井解释 流体识别 判别模型 空间距离 欧氏距离 马氏距离 天然气组分 四川盆地西部 晚三叠世

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.07.007

A new method for the mud logging identification of reservoir fluids : A case study from the Xujiahe reservoirs in the western Sichuan Basin

Wei Yangqing¹, Wei Feilong², He Haoyang³, Liu Feng⁴, Jiang Jun⁵

(1. Geological Exploration and Development Research Institute of Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Chengdu, Sichuan 610213, China; 2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Mud Logging Company of Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China; 5. Technical Monitoring Center of Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 7, pp. 43-46, 7/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: For lack of robust theoretical guidance in the respect of genetic mechanism, inspection accuracy and interpretation model, and without any reliable evaluation models and standards, the traditional interpretation techniques of mud logging data produces results with poor reliability. At present, drilling targets are getting more diversified, and fluid identification becomes challenging for complex reservoirs, deep reservoirs, thin interbedded reservoirs and unconventional reservoirs. In view of this, based on mathematical statistics technologies, the natural gas component from the mud logging chromatographic analysis was first taken as the basic data set; the different response abilities were then analyzed of Euclidean distance and Mahalanobis distance to multiple variables in variable space. Additionally, the different abilities were discussed of spatial distance-based fluid identification models in identifying gas and water layers. Finally, a new identification model was built and applied in the fluid identification of the Upper Triassic Xujiahe reservoirs in the western Sichuan Basin, achieving a coincidence rate of above 83%. In combination with the characteristics of this new model, an optimized model was further built and also compared with the Euclidean model and Mahalanobis model. The optimized model was more powerful in fluid identification and the accuracy of prediction results reached up to 97.22%. Meanwhile, a mathematics-based evaluation method of traditional mud logging interpretation was proposed and a comparative analysis of the optimized model and traditional model was also performed.

Key words: mud logging interpretation, fluid identification, discrimination model, spatial distance, Euclidean distance, Mahalanobis distance, gas component, Sichuan Basin west, Late Triassic

作者简介: 魏阳庆, 1964 年生, 高级工程师; 从事石油天然气勘探开发研究工作。地址: (610051) 四川省成都市建设北路一段 83 号。电话: (028) 86015095。E-mail: weiyq_dy@cnpcc.com.cn

目前气测录井资料的解释技术主要是利用烷烃组分图解法来区分流体性质,以三角形烃组分图解法为主,辅以烃比值法和非烃组分法^[1-3]。其原理就是利用烷烃气体组分数据的内部规律确定储层流体性质的评价方法,所谓内部规律是气体中轻、中及重烃之间的相互关系在特定环境和特定区块与流体性质间统计规律在图版上的直观反映^[4]。因此,可由此推论出利用现代数理统计技术原理和计算技术手段对气测录井数据进行更深入的计算分析,将会更准确可靠地反映出流体性质^[5-7]。

笔者利用数理统计中多元判别分析技术,结合变量空间中欧氏距离与马氏距离对多元变量间相互影响的不同反应能力,对气测录井数据进行深入分析,提出了几种优化的储层流体识别方法,并对烷烃组分图解法和文中给出的优化方法进行了识别效果的对比分析。

1 基本原理

1.1 距离计算

假设数据空间为 n 维,也就是说每个样本点有 n 个变量, x_r 和 x_s 是空间中两个点, d_{rs} 为两点间的距离。

1.1.1 欧氏距离

$$d_{rs}^2 = (x_r - x_s)(x_r - x_s)' \quad (1)$$

欧氏距离为 x_r 和 x_s 间常规距离,它强调整体的差别,降低了个体的作用。

1.1.2 马氏距离

$$d_{rs}^2 = (x_r - x_s)V^{-1}(x_r - x_s)' \quad (2)$$

V 是 x_r 和 x_s 的协方差矩阵。马氏距离消除了变量之间相关性干扰,突出了个体的作用^[8]。

1.2 多元判别模型

对色谱分析测量的天然气组分(全烃、甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷)信息^[9],由已知试油结论井的气测数据来建立流体识别的数学模型。由于欧氏距离将样品的不同属性(即各指标或各变量)之间的差别等同看待,而天然气组分里中、重烃部分占有比例很小^[10],所以从理论上讲,采用欧氏距离算法模型更突出了轻烃部分的作用,因而用来识别气层更有效,相反马氏距离突出了变化微小的变量作用,所以采用马氏距离算法模型对识别水层更有效。

多元判别数理统计模型选择为全二次式模型和线性模型:

$$f_E(X) = \omega + a \sum_{i=1}^n x_i + 2a_{ij} \sum_{i < j} x_i x_j + a_{ii} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3)$$

$$f_M(X) = \omega + a \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

判别原理采用 Bayes 判别准则^[8],通过已知样本数据的训练,得到相应判别模型系数 ω 、 a 及 a_{ij} 。模型中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, X 为数据空间中的一点,在两组判别分析中 $f(X) = 0$ 是模型划分不同组别的标准。根据上述对欧氏及马氏距离性质的分析,全二次式模型计算中使用欧氏距离,该模型主要用于识别气层;线性模型计算中使用马氏距离,该模型主要用于识别含水储层。

2 储集层流体性质识别

2.1 判别模型建立

四川盆地川西前陆盆地上三叠统须家河组现阶段主要勘探目的层是须二、须四、须六段,须一、须三、须五段为主要烃源层^[11-15]。

笔者选取研究区内已有试油结论的 20 口井中的 36 个层段的色谱分析天然气组分作为数据集,采用上述提出的识别方法,进行了储层流体性质识别。数据集流体性质分布为:气层 18 个,水层 18 个。采集的录井气测信息包括全烃、甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷。表 1 列出两种判别模型对样本数据集的判别结果。

表 1 两种模型判别结果表

模型类型	判别结果		
	气层/ 个	水层/ 个	正确率
全二次式+欧氏距离	18	13	(18+13)/36=86.11%
线性式+马氏距离	12	18	(12+18)/36=83.33%

从表 1 中可以看出,两个模型对整个样本的判别正确率均在 75% 以上,统计意义上是有效的判别模型^[16-17]。判别结果显示,欧氏模型对气层确实有很好的识别效果,而马氏模型对水层有很好的识别效果,说明了各气体组分之间的相互关系是气测资料识别流体性质的基础,在流体判别模型中采用不同空间距离计算方法确实能提高模型识别不同流体性质的能力。

在现场应用中,应该根据区域地质情况结合钻井、电测、取心等资料,灵活选用不同判别模型进行流体性质的识别,以期达到更好的识别效果。

2.2 判别模型优化

由于欧氏和马氏模型分别对气层及水层有良好的识别作用,那么如果在模型中采用欧氏模型的二次函

数形式,充分突出气层气测组分中轻烃部分增大的作用,同时模型中的空间距离采用马氏距离的算法,使气测组分中重烃部分在非气层时的作用被模型反映出来,结合两者的特点,笔者提出了如下计算模型:

$$f(X) = \omega + a \sum_{i=1}^n x_i + a_{ii} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (5)$$

模型本身为二次式,由于马氏距离的应用只适用于线性函数,所以对式(5)进行如下变换:

$$y_i = x_i^2 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$f(X) = \omega + a \sum_{i=1}^n x_i + a_{ii} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

上式为线性函数形式,即在系数计算过程中,把 x_i^2 视为一个单独的变量,则式(5)转换成线性公式,在模型中空间度量采用马氏距离。表 2 为该模型对样本数据集的判别结果。

表 2 优化模型判别结果表

模型类型	判别结果		
	气层	水层	正确率
优化模型	18 个	17 个	(18+17)/36=97.22%

表 2 显示优化模型较欧氏模型及马氏模型对储层流体性质的识别能力有极大的提高。

3 识别方法对比分析

主要以三角形气体组分图版法、烃比值图版法和烃比值法作为传统气测资料储层流体识别方法来进行对比分析。3 种传统方法均借助于组合不同的气体组分计算相应比值,求得几个判别指标参数,结合区域测试资料,通过绘制图版方式划分出流体判别标准。绘制图版过程以直角坐标系为基础,由点、直线、直线交点、交点连线构成图版^[3],从数学意义上看就是一个以判别指标为变量的线性系统求解过程,并且空间量度关系为欧氏距离,所以当样本数据空间一定时,其计算判别精度不会高于相同变量的多元线性分析判别精度^[17]。

通过上述分析,可以把三角形气体组分图版法、烃比值图版法和烃比值法的判别指标参数作为变量元,以文中所给的气测样本数据集作为样本空间,构建多元线性分析模型。在此基础上进行判别模型识别效果比较。表 3 是 3 种传统方法的判别效果。

图 1 表明笔者提出的储层流体识别方法均好于 3 种传统的方法。传统方法中以三角形气体组分图版法

表 3 传统方法判别结果表

模型类型	判别结果		
	气层/ 个	水层/ 个	正确率
三角形气体组分图版法	14	9	(14+9)/36=63.89%
烃比值图版法	7	12	(7+12)/31=61.29%
烃比值法	12	8	(12+8)/36=55.56%

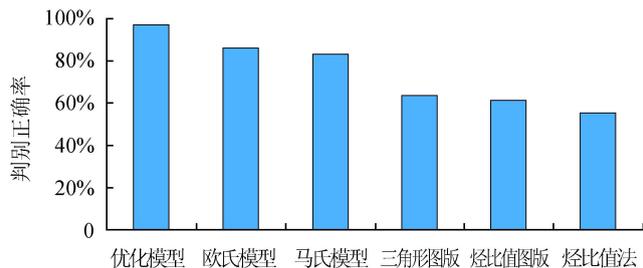


图 1 流体性质识别模型对比分析图

为最好,烃比值图版法次之,烃比值法再次,与实际应用情况相符合。但 3 种方法的判别正确率均小于 75%,从数理统计角度看判别能力不强,这也是此类方法在识别复杂储层流体性质时效果不好的原因之一。

4 结束语

气体组分之间的相互关系是气测资料识别流体性质的基础;不同的空间距离模型识别不同流体的能力也不同,欧氏距离适合构建识别以气层为主的模型,马氏距离则适合构建识别以水层为主的模型;建立在数理统计分析技术之上的储层流体判别模型要优于各种传统的图版比值方法;文中也提出了一种科学的且具有严格数学意义的检测各类气测录井资料解释方法精度的对比分析手段。

参 考 文 献

[1] 张殿强,李联玮.地质录井方法与技术[M].北京:石油工业出版社,2010:124-137.
ZHANG Dianqiang, LI Lianwei. Geological logging method and technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:124-137.

[2] 唐家琼,郑永,熊驰原,等.气体钻井的录井监测方法[J].天然气工业,2010,30(3):12-15.
TANG Jiaqiong, ZHENG Yong, XIONG Chiyuan, et al. Logging monitoring methods in gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(3):12-15.

[3] 刁素,颜晋川,任山,等.川西地区定向井压裂工艺技术研

- 究及应用[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(1):111-115.
- DIAO Su, YAN Jinchuan, REN Shan, et al. Research and field application on hydraulic fracturing technology of directional wells in western region of Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(1): 111-115.
- [4] 杨立平, 杨进. 现代综合录井技术基础及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 93-97.
- YANG Liping, YANG Jin. Modern comprehensive logging technology base and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 93-97.
- [5] 戴长林, 石文睿, 程俊, 等. 基于随钻录井资料确定页岩气储层参数[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 17-21.
- DAI Changlin, SHI Wenrui, CHENG Jun, et al. Shale gas reservoir parameter calculation based on logging while drilling (LWD) data[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 17-21.
- [6] 钟大康, 张国喜. 人工神经网络在录井油气水层识别中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 28-30.
- ZHONG Dakang, ZHANG Guoxi. Application of artificial neural network on the oil-gas-water recognition in the well logging [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(3): 28-30.
- [7] 朱根庆, 黄志林, 邹克元. 数学录井理论的建立及应用前景探讨[J]. 录井工程, 2011, 22(4): 5-11.
- ZHU Genqing, HUANG Zhilin, ZOU Keyuan. The establishment of the mathematical logging theory and its application prospect[J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22(4): 5-11.
- [8] 康永尚. 现代数学地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 133-140.
- KANG Yongshang. Modern mathematics geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 133-140.
- [9] 韩永刚, 赵容容, 李平, 等. 碳酸盐岩定量分析技术及其在四川盆地录井工作中的应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 48-51.
- HAN Yonggang, ZHAO Rongrong, LI Ping, et al. Quantitative analysis of carbonates and its application to logging in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 48-51.
- [10] 黄东, 戴鑫, 戴赟, 等. 川西北部河湾场气田天然气地球化学特征及其气源探讨[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 37-40.
- HUANG Dong, DAI Xin, DAI Yun, et al. Geochemical behaviors and gas origins in the Hewanchang Gas Field, northern part of the Western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3): 37-40.
- [11] 袁海锋, 倪根生, 邓小江, 等. 龙女寺构造须家河组天然气成藏主控因素[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 6-12.
- YUAN Haifeng, NI Gensheng, DENG Xiaojiang, et al. Control factor of natural gas accumulation in Xujiache Formation Longnüsi Structure, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 6-12.
- [12] 张春, 蒋裕强, 王立恩, 等. 川东北地区须家河组二段储层差异性分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(2): 29-36.
- ZHANG Chun, JIANG Yuqiang, WANG Li'en, et al. Analysis of reservoir differences of member 2 of the Xujiache Formation in northeast Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(2): 29-36.
- [13] 张静, 张虎权, 李延丽, 等. 蜀南地区须家河组致密砂岩含气性综合预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 45-47.
- ZHANG Jing, ZHANG Huquan, LI Yanli, et al. Gas bearing prediction on tight sandstone gas reservoirs of Xujiache Formation in south Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 45-47.
- [14] 徐伟, 杨洪志, 陈中华. 广安地区须六段气藏特征及开发策略[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 19-21.
- XU Wei, YANG Hongzhi, CHEN Zhonghua. Characteristics of the sixth member of Xujiache Formation gas reservoirs in Guang'an area and its development tactics [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 19-21.
- [15] 李凌, 谭秀成, 周素彦, 等. 四川盆地雷口坡组层序岩相古地理[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 13-22.
- LI Ling, TAN Xiucheng, ZHOU Suyan, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Leikoupo Formation, Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(4): 13-22.
- [16] 李雄炎, 周金昱, 李洪奇, 等. 复杂岩性及多相流体智能识别方法[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 243-248.
- LI Xiongyan, ZHOU Jinyu, LI Hongqi, et al. Computational intelligent methods for predicting complex lithologies and multiphase fluids [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(2): 243-248.
- [17] 朱永生. 实验数据多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 106-110.
- ZHU Yongsheng. The experimental data of multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Science Press, 2009: 106-110.