

Fisher 判别分析在油藏描述中的应用

方朝亮* 张一伟 王才经

(石油大学 北京)

提 要

油藏综合评价是油藏描述研究的重要内容,是油藏描述成果的集中反映,利用油藏描述技术确定的各项地质参数定量开展油藏综合评价是一种定量化、科学化的评价技术,本文系统介绍 Fisher 判别分析方法及原理,对冷东—雷家地区沙一、二段和沙三段进行了区块评价,其评价结果已成为制定勘探开发的重要依据,实践证明评价结果是客观的、科学的。

主题词 油藏描述 数学地质学 统计分析 油藏评价 油藏数值模拟
综合评价

1 前 言

油藏描述是自 70 年代以来发展起来的一种综合评价油气藏的技术方法,该方法以现代石油地质理论为基础,以数学地质、计算机技术为手段,综合应用地质、测井、地震、测试等资料对油藏的几何形态、储层物性、流体性质及其空间分布进行研究,从而为油藏综合评价、油藏数据模拟、储量计算、优化勘探开发方案提供可靠的依据。因而它是一项为勘探开发准备服务的应用技术,在勘探及开发不同阶段都是重要的技术支柱。油藏综合评价是油藏描述最终成果,是对油藏地质特征的全面认识与总结,其目的是为制定勘探开发方案、寻找有利含油气区带提供科学的地质依据。本文用 Fisher 综合判别分析方法,应用油藏描述技术获得的多项定量指标对冷东—雷家地区进行了区块评价,提出了反映油田实际的综合评价指标及标准,结果起到了指导油田生产实践的作用,取得了较好的应用效果。

2 方法概述

判别分析是判别样品所属类型的一种地质统计学方法,其特点是能把一个样品的许多指标综合成一个指标,根据这个指标综合确定样品归属。

设有 m 个母体 A, B 等分别包含 n_A 和 n_B 个样品,每个样品包含有 P 项指标

$$X_{iR}(A) \quad i = 1, 2, \dots, P; R = 1, 2, \dots, n_A$$

$$X_{iR}(B) \quad i = 1, 2, \dots, P; R = 1, 2, \dots, n_B$$

设判断向量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_P)^T$ 形成的判别函数为

$$Y_R(A) = \sum d_i X_{iR}(A) \quad R = 1, 2, \dots, n_A \quad (1)$$

* 方朝亮, 1964 年 4 月生。1989 年 7 月毕业于石油勘探开发研究院研究生部(北京)。现为石油大学(北京)讲师。通讯处:北京昌平水库路石油大学地球科学系。邮政编码:102200。

式中 Y 为综合指标。

设母体 A 的均值和协方差分别为

$$\bar{X}_{iR}(A) = \frac{1}{n_A} \sum_{k=1}^{n_A} X_{iR}(A) \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (2)$$

$$\sigma_{ij}(A) = \frac{1}{n_A - 1} \sum_{R=1}^{n_A} [(X_{iR}(A) - \bar{X}_i)(X_{jR}(A) - \bar{X}_j(A))] \quad (3)$$

对母体 B 可类似地定义母体 B 的均值和协方差分别为

$$\bar{X}_{iR}(B) = \frac{1}{n_B} \sum_{k=1}^{n_B} X_{iR}(B) \quad i = 1, 2, \dots, P; R = 1, 2, \dots, n_A \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}(B) = \frac{1}{n_B - 1} \sum_{R=1}^{n_B} [(X_{iR}(B) - \bar{X}_i)(X_{jR}(B) - \bar{X}_j(B))] \quad (5)$$

综合指标 Y 的均值和协方差分别为

$$\bar{Y}_{iR}(A) = \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^p Y_{iR}(A) = \sum_{i=1}^p d_i \left[\frac{1}{n_A} \sum_{k=1}^{n_A} X_{iR}(A) \right] = \sum_{k=1}^p d_i \bar{X}_i(A) = d^r \bar{X}(A) = d^r \bar{X}(A) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_Y(A) &= \frac{1}{n_A - 1} \sum_{R=1}^{n_A} [Y_k(A) - \bar{Y}(A)]^2 \\ &= \frac{1}{n_A - 1} \sum_{k=1}^{n_A} \left\{ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p d_i d_j [X_{ik}(A) - \bar{X}_i(A)][X_{jk}(A) - \bar{X}_j(A)] \right\} \\ &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p d_i d_j \delta_{ij}(A) = d^r \sum(A) d \end{aligned} \quad (7)$$

从上式(6)、(7)看出综合指标 $Y(A)$ 的均值和方差都与 d 有关,待求的 d 能使两个母体的均值尽可能分离,每个母体的方差尽可能小,若求 d 使

$$R(d) = \frac{[y(A) - \bar{y}(B)]^2}{D_y(A) + D_y(B)} = \frac{\{d^r [\bar{X}(A) - \bar{X}(B)]\}^2}{d^r [\sum(A) + \sum(B)] d}$$

达到极大值,这种确定判别向量 d 的原则称为 Fisher 判别原则,用函数求极值的方法求 d 。为简单起见,记

$$\Delta = \bar{X}(A) - \bar{X}(B) \quad A = \sum(A) + \sum(B)$$

由
得

$$\frac{dR(d)}{dd} = \frac{2(d^r \Delta) \Delta (d^r A d) - (d^r \Delta)^2 (2A d)}{(d^r A d)^2} = 0$$

$$(d^r A d) \Delta - (d^r \Delta) A d = 0$$

记其解为 d' , 则

$$d' = \frac{d^r A d'}{d^r \tau \Delta} A^{-1} \Delta = \alpha_1 A^{-1} \Delta$$

系数 α_1 可由归一化条件 $d'^T d' = 1$ 算出

$$\alpha_1 = 1 / \sqrt{(A^{-1} \Delta)^T (A^{-1} \Delta)}$$

用一个判别向量有时不一定判准,为此引入第二个判别向量 d'' , 使 d'' 垂直 d' 构成判别圈,即求 d'' , 使

$$\begin{cases} R(d') = (d'^r \Delta)^2 / (d''^r A d'') = \max \\ d''^r d' = 0 \\ d''^r d'' = 1 \end{cases}$$

这是一个带约束的极值问题,可用 Lagrange 乘子法求 d'' 和 λ ,使

$$\begin{aligned} Q(d'') &= \frac{(d'^r \Delta)^2}{d''^r A d''} - \lambda d''^r d' = \max \\ K &= \frac{d''^r \Delta}{d''^r A d''} \quad \alpha_2 = \frac{1}{K} \quad \beta = \frac{\lambda}{2K} \\ \frac{dQ}{d d''} &= 2K \Delta - 2K^2 A d'' - \lambda d' = 0 \end{aligned}$$

$$\text{因此} \quad d'' = \frac{1}{K} (A^{-1} \Delta - \frac{\lambda}{2K} A^{-1} d') = \alpha_2 (A^{-1} \Delta - \beta A^{-1} d') \quad (8)$$

利用正交条件(7)得

$$\beta = \frac{d' A^{-1} \Delta}{d'' A^{-1} d'} \quad (9)$$

而 α_2 可以由归一化条件 $d''^r d'' = 1$ 得出:

$$\alpha_2 = 1 / \sqrt{A^{-1} \Delta - \beta A^{-1} d'}^r (A^{-1} \Delta - \beta A^{-1} d') \quad (10)$$

如有必要还可以用类似方法求第三个、第四个判别量。

3 应用实例

3.1 评价的地质基础

油藏综合评价是油藏描述工作的继续,开展该项工作是在油藏描述研究工作取得丰硕成果的基础上进行的,油藏描述的精确性、科学性是评价成败的关键,冷东—雷家地区整个油藏描述成果包括:基础地质研究、砾岩储层综合评价、关键井研究及多井评价、地震横向预测、流体性质及分布规律、油藏地质模型建立及综合评价、油藏描述微系统及图形显示,这些研究成果为开展油藏综合评价工作提供了准确可靠的地质参数。

3.2 评价指标选取

油藏综合评价是建立在油藏描述取得丰硕成果基础上,因此选择指标是综合本区各项研究成果的定量、半定量指标,主要包括:

(1) 构造岩相带

指构造和岩相在三维空间组合形式,根据本区构造与岩相配置和所处构造位置分为三类:有利的构造岩相带,(如断块与滑塌浊积岩相、轴向重力流水道相相互配置);分支水道砂岩相、分支水道细砾岩-砂岩相与断块配置构成的构造岩相带。

较有利构造岩相带:分支水道细砾岩相与断块、断鼻配置构成的构造岩相带。

较差构造岩相带:分支水道中砾岩、前缘前端微相与断块、断鼻配置构成的构造岩相带。

(2) 原油物性参数:

根据原油物性好坏分为三类:

I类 原油比重小于 0.89,在 50℃ 条件下粘度小于 50mPa·s 的正常原油。

Ⅱ类 原油比重介于 0.89~0.92,在 50℃条件下粘度为 50~100mPa·s 过渡型原油。

Ⅲ类 原油比重大于 0.92,50℃条件下粘度大于 100mPa·s 的重质稠油。

(3) 储层非均质参数:

根据储层非均质强弱分为三类:

Ⅰ类 弱非均质储层属渗透率变异系数小于 0.50,级差小于 3。

Ⅱ类 中等非均质储层属渗透率变异系数介于 0.50~0.70,级差介于 3~5 之间。

Ⅲ类 强—极强非均质储层属渗透率变异系数大于 0.7,级差大于 5。

(4) 油层物性参数:根据渗透率参与孔隙度参数分为四类:

Ⅰ类 渗透率大于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属高孔高渗类;

Ⅱ类 渗透率介于 $100 \sim 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中孔中渗类;

Ⅲ类 渗透率小于 $10 \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中孔低渗类;

Ⅳ类 渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中孔特低渗类。

(5) 油层厚度:由于缺乏测井解释油层厚度,因此采用油层有效厚度来表征。

(6) 储能参数:评价单元不同,分类有别,按小层、亚段两个评价单元分类标准见表 1

表 1 储能参数评价标准

Table 1 Evaluation standard of reservoir capacity

评价单元	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
小层	>1	0.8~1	<0.8
亚段	>5	2~5	<2

(7) 含油面积 $S(\text{km}^2)$

(8) 圈闭内油气充满系数:指圈闭内含油面积与圈闭面积之比,充满系数愈高圈闭内油气富集程度愈高,反之则愈低。

(9) 储量丰度:根据储量丰度分为三类:

Ⅰ类 高丰度 $>300 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$; Ⅱ类 中丰度 $<(100 \sim 300) \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$;

Ⅲ类 低丰度 $(50 \sim 100) \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$; Ⅳ类 特低丰度 $<50 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$ 。

(10) 地质储量:根据储量大小分为:

特大油田大于 $10 \times 10^8 \text{t}$;

大型油田为 $(1 \sim 10) \times 10^8 \text{t}$;

中型油田为 $(0.1 \sim 1) \times 10^8 \text{t}$;

小型油田为小于 $0.1 \times 10^8 \text{t}$ 。

3.3 评价结果

利用 Fisher 综合判别分析方法,对冷东—雷家地区各断块分小层、分亚段进行系统评价,下面分述其评价结果。

3.3.1 小层评价

对雷 43、雷 41、冷 43、冷 37、冷 68、冷 35~46 六个断块或六个小层进行了评判,评判结果见表 2。

(1) 有利的区块(Ⅰ类):储层非均质中等,渗透率变异系数一般为 0.5~0.7;油层物性为中孔中渗,孔隙度一般为 16%~18%,渗透率一般为 $160 \sim 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;圈闭充满系数一般大于 0.80;油层厚度大、含油饱和度高,油层厚度一般大于 40t,含油饱和度高于 57%;储能参数高,一般大于 4.5;储量丰度高,一般大于 $300 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$;如冷 43 断块沙三段 3 亚段 1、2 小层。

表2 冷东—雷家地区分小层综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of layer in Lengdong—Leijia region

分 级	小层	断 块					
		冷 43	雷 41	雷 43	冷 37	冷 68	冷 35~46
I	S_3^3-1				S_{1+2}^1-1		
	S_3^3-2				S_{1+2}^1-2		
II	S_{1+2}^1-1		S_{1+2}^1-1	S_{1+2}^1-1	S_3^3-1		
	S_3^3-3				S_{1+2}^1-3		
III					S_3^3-1	S_3^3-1	S_3^3-1
		S_{1+2}^1-2	S_{1+2}^1-2	S_{1+2}^1-2	S_3^3-2	S_3^3-2	S_3^3-2
					S_3^3-3	S_3^3-3	S_3^3-3

(2) 较有利的区块(II类):储层非均质中等,变异系数一般为0.6~0.70;油层物性为中孔中渗,孔隙度一般为15%~17%,渗透率一般为 $200\sim 500\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;圈闭充满系数一般为0.3~0.8;油层厚度一般为10~30m,含油饱和度为50%~55%;储能参数一般为1~4.4;储量丰度一般为 $100\sim 300\times 10^4\text{t}/\text{km}^2$;如冷43块沙一、二段1亚段1小层。

(3) 较差的区块(III类),储层非均质为中等—强,变异系数一般为0.6~1.0;油层特性储层以中孔中渗、中孔低渗为特征,如冷35~46井区孔隙度一般为13%~16%,渗透率小于 $10^{-3}\mu\text{m}^2$;圈闭充满系数介于0.1~0.3;油层厚度一般小于10m;储能参数小,一般为0.3~1;储量丰度一般介于 $30\sim 100\times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。如冷37块沙三段3亚段1、2、3小层。

3.3.2 亚段评价

用综合判别方法对雷43、雷41、冷43、冷37、冷48、冷46六个断块5个亚段进行了评判,结果见表3。

表3 冷东—雷家地区分亚段综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of sub-formation in Lengdong—Leijia region

分 级	小层	断 块					
		冷 43	雷 41	雷 43	冷 37	冷 68	冷 46
I	S_{1+2}^1		S_{1+2}^1	S_{1+2}^1	S_{1+2}^1		
	S_3^N				S_3^N		
II	S_{1+2}^1		S_{1+2}^1		S_{1+2}^1		S_3^1
	S_3^1						
III						S_3^N	S_3^N
	S_3^N						

(1) 有利的区块(I类),主要特征为:储层非均质为中等,渗透率变异系数为0.5~0.7;油层储集物性为孔隙度一般为16%~20%,渗透率为 $16\sim 450\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;圈闭充满系数为0.50~1;油层厚度一般为30~100m;储能参数一般为3~10;储量丰度一般大于 $300\times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。

(2) 较有利的(II类),主要特征为:储层非均质为弱—中等,渗透率变异系数为0.40~0.7;油层储集物性为中孔、中渗;油层充满系数为0.2~0.8;圈闭厚度一般为10~20m;储能参数一般为1~3;储量丰度为 $100\sim 300\times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。

(3) 较差的区块(Ⅲ类),主要地质特征为:储层非均质为中等一强,渗透率变异系数一般为 0.5~1.0 油层储集物性以冷 35—46 井区为中孔特低渗,孔隙度小于 16%,渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。油层厚度一般小于 5m;储能参数小于 0.5;储量丰度为 $20 \sim 100 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$ 。

4 应用效果分析

利用 Fisher 综合判别根据评价结果分亚段、小层编绘了油藏评价综合图,为制定勘探开发方案提供了可靠地质依据,开展油藏综合评价是一种定量化研究方法,研究成果具科学性、定量性的特点,辽河油田管理局给予高度评价,其成果已广泛应用在勘探开发实践中,并取得了较好的经济效益。1993 年 4 月该项成果通过了部级专家鉴定,与会专家一致认为该方法值得推广。

参 考 文 献

- [1] 赵旭东. 石油数学地质概论. 北京:石油工业出版社,1992-04.
[2] 中国科学院地质研究所. 数学地质引论. 北京:地质出版社,1976.

APPLICATION OF FISHER IDENTIFICATION ANALYSIS IN OIL RESERVOIR DESCRIPTION

Fang Chaoliang Zhang Yiwei Wang Caijing
(Petroleum University, Beijing)

Abstract

As ynthetic appraised of the oil reservior is an important item in the research of oil reservoir description, and is a reflection of results of reservoir description by means of all geological parameters determined by this technology evaluation. An appraised of oil reservoir is a kind of quantitive and scientific evaluation technology. This paper introduces the principle and method of Fisher identification analysis systematically. $S_{1+2}S_3$ in Leng Dong of Lei Jia area is appraised.

The appraised result have become an important basis for exploration and development, field practice has shown that the result is scientific.

Key words reservoir description mathematical geology statistical analysis reservoir evaluation reservoir numerical simulation comprehensive evaluation