

非线性映射分析判断断层封闭性

吕延防^{*} 陈章明 陈发景

(大庆石油学院)

(中国地质大学)

提 要

非线性映射分析是一种“几何图像降维”的数学方法。在近似保持样品点间关系的基础上,通过非线性变换后将高维空间中几何图像转换到二维平面上,以直观考察各样品点间的关系。把多个影响断层封闭性的因素看成是多维坐标,则每条断层即是这多维空间中的一个点。封闭能力近似的断层,所在坐标中空间位置相近,经非线性映射降维之后,封闭能力相似的断层在二维平面中具相近的位置关系。将已知封闭性断层与被判断封闭性断层一同作非线性映射分析,根据被判断断层所落入点群的位置,可较准确地判断出断层的封闭性能。

主题词 非线性 分析 断层 封闭性

1 前 言

正断层封闭性是多种地质因素共同作用的结果,选择适当的数学地质办法将诸多地质因素通过数学变换与计算进行综合分析,可确切地反映断层的实际封闭能力。大量的实例分析证明,非线性映射分析是一种可信的断层封闭性判别方法。

2 基本原理

非线性映射分析是一种“几何图像降维”的数学方法,由J. W. Sammon于1969年提出。方法是通过某种非线性变换后,把高维空间几何图像转换成低维空间中图像,要求变换后仍能近似地保持原像的几何关系,由此在低维空间中直观地看到一些高维样品相互关系的近似图像。

非线性映射分析分Q型和R型两类,Q型是用距离系数矩阵表示样品点之间的关系,R型通常是用相关系数矩阵或斜方差矩阵表示变量间关系,前者主要用于地质体的分类,后者主要用于地质变量的分类。断层封闭性的判别是将被判断的断层与已知封闭性断层一道进行数学变换和分类,以断定被判断断层封闭性的归属,属于地质体的分类研究,故选择Q型非线性映射分析。其基本原理为:

设有 N 个样品,每个样品 p 个变量,则每个样品点就相当于 R^p 空间中的一个点, $X = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]$, $i = 1, 2, \dots, N$,现在要把 R^p 空间中的 N 点 x_1, x_2, \dots, x_N 映射到低维空间 R^l ($l < p$)中去,即通过非线性映射后,把 R^p 中的 N 点映射到 R^l 空间中,得到相应的 N 点:

$$Y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{il}] \quad i = 1, 2, \dots, N$$

^{*} 吕延防,1993年毕业于中国地质大学。现任大庆石油学院勘探系石油地质教研室主任。通讯处:黑龙江省安达市。邮政编码:151400。

取 $l=2$, 以便绘图。条件是: 经过映射后, 在 R^l 空间中点间的关系基本保持在 R^p 空间中点间的关系, 即 R^l 中 N 点间的距离仍近似于 R^p 空间中 N 点间的距离。

为此, 引入变量 E 作为由高维变换到低维的约束条件。 E 称之为映射误差, 它是用 p 维空间中所有点的距离 d_{ij}^* 和 l 维空间中所有点的距离 d_{ij} 来定义的, 表示 l 维空间中 N 点的构形对于 p 维空间中 N 点构形的拟合程度。

$$E = \frac{1}{NF} \sum_{i < j} W_{ij} (d_{ij}^* - d_{ij})^2$$

式中 $NF = \sum_{i < j} d_{ij}^* = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^*$ 为标准化因子;

$W_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^*}$ 为权因子;

d_{ij}^* 为 R^p 空间中样品点 i 和 j 之间的距离;

d_{ij} 为 R^l 空间中样品点 i 和 j 之间的距离。

$$d_{ij}^* = \sqrt{\sum_{k=1}^p [x_{ki} - x_{kj}]^2}$$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^l [y_{ki} - y_{kj}]^2}$$

所以, 映射误差 E 是 $d_{ij} (i, j=1, 2, \dots, N; i < j)$ 的函数, 其作用是用来作为由高维变换到低维的约束条件, 使原空间 R^p 中各样品点之间的距离和新空间 R^l 中相应各样品点距离之差的平方和达到小于 E 时, 来求得新空间 R^l 中样品点的几何构形。计算步骤见参考文献 1。

把每个影响断层封闭性的因素看成是多维空间中的一维坐标, 则每条断层即是这多维空间中的一个点, 断层的封闭能力不同, 其所在空间位置就不同, 封闭能力相似的断层, 控制其封闭能力的地质因素相似, 所在坐标中空间位置就相近。在近似保持各断层间几何关系的前提下, 通过非线性映射分析使多维坐标降至二维平面, 可在二维平面上研究不同封闭性断层所在的位置关系。

可见, 应用该方法研究断层封闭性时, 必须首先正确找出影响断层封闭性的主要地质因素, 并有一定数量经研究已确认是具有某种封闭能力和不具封闭能力的断层作为分析其它被判断断层的“参照物”, 在非线性映射分析的二维平面图上, 与“参照物”相近的断层具有与“参照物”相似的封闭性。

3 参数选择

断层封闭性本质上取决于差异排替压力^[2,4,5], 即当目的层排替压力小于与之对置的断层另一侧岩层的排替压力或断裂带的排替压力时, 断层在侧向上具封闭性, 当目的储层排替压力小于上覆盖层中断裂带的排替压力时, 断层在垂向上具封闭性。

然而, 大量测取断层两盘岩层的排替压力是不现实的, 储层之上盖层内断裂带的排替压力实际上无法测得, 这样势必造成利用排替压力评价断层封闭性的困难。为解决这一难题, 通过

大量已知封闭性断层的研究,总结出影响断层封闭性的地质因素,从而间接反映断层两盘对置岩层和断裂带排替压力的大小。根据前人的结论及笔者的研究,认为以下参数是影响断层封闭性的主要因素。

3.1 断移地层的砂泥比值

当目的储层与断层另一侧的泥质岩层相对置时,断层具有侧向封闭性^[4,5]。断层两边都是渗透性地层相并置时,断层泥可提供良好的垂向和侧向封闭^[6]。在很多情况下,断层两盘是否

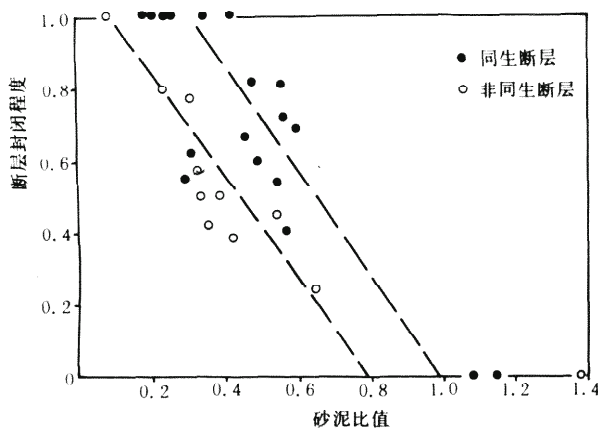


图1 断层封闭程度与砂泥比值关系

Fig.1 The relationship between the sealing degree of fault and the sand-clay ratio

是砂泥层相互对置难以知晓,断裂内是否有断层泥的充填也无法知道,可通过研究段内断层断移地层的砂泥比值来间接反映上述两种情况的可能性。所谓断移地层的砂泥比值系指研究段内砂岩层累加厚度与泥岩层累加厚度之比。断移地层的砂、泥比值越低,表明被断层错动的地层泥质含量越高,断层两盘砂泥岩层对置的概率就越大,断裂内泥质充填的可能性也越大,断层封闭性就越强。

图1是辽河油田34条已知封闭性断层的统计结果,纵坐标是断层的封闭程度,指被断层遮挡的一盘中含油层的累加厚度与该含油层段内砂层

总厚度的比值;横坐标是断移地层的砂泥比值。根据图中点的分布趋势推断,同生断层砂泥比值大于1.0,非同生断层大于0.8,其封闭性能极差或不具封闭能力。造成同生断层与非同生断层在相同砂泥比值情况下封闭程度不同的原因,可能是断层形成时间及断裂充填物性质的差异所致。

3.2 断移地层的砂泥岩层厚度

泥岩层作为砂岩储层的盖层,其单层厚度越大,越不易被断层错开,如果断层未将盖层错开,沿断面向上油气渗漏的可能性极小^[9],若断层将泥岩层错开,泥岩层越厚,侧向封堵对盘储层的可能性越大。

相反,砂岩层越薄,越易被断层错开,形成侧向被泥岩层封挡的可能性也越大,反之亦然。

3.3 断距

大断距的断层会增大形成裂缝的可能性^[7],大断距断层往往活动期次多,断裂带宽度大,断裂充填的性质复杂,因此也增大了油气垂向沿断层渗漏的风险。

表1 封气断层断移地层砂、泥比值统计表
Table 1 The sand-clay ratio for the gas sealing faults

地区	油气田名称	断层名称	断距 (m)	倾角 (°)	断层 性质	断移地层砂泥比值		
						对盘	本盘	平均
辽河	法哈牛油田	法 39-37~法 41-41	120	72	同生	0.41	0.55	0.48
	法哈牛油田	法 43-41~法 45-43	15	75	非同生	0.70	0.45	0.58
	兴隆台油田	法 109~兴 34	80	50	同生	0.21	0.29	0.25
	兴隆台油田	兴 82~兴 209	79	40	非同生	0.22	0.49	0.36
	黄于热油田	黄 5~黄 15-12	60	78	同生	0.24	0.22	0.23
	黄于热油田	黄 8-8~黄 32	45	69	非同生	0.13	0.02	0.07
	牛居油田	牛 23-22~牛 22-23	35	85	同生	0.45	0.25	0.35
	青龙台油田	龙 26~龙 26-16	30	70	同生	0.30	0.32	0.31
	大洼油田	洼 10-14~洼 12-18	44	65	同生	0.45	0.49	0.47
	大洼油田	洼 14-20~洼 16-22	36	60	同生	0.38	0.72	0.55
大洼油田	洼 9-12~洼 9-14	52	75	同生	0.70	0.49	0.59	
大港	港东油田	中 9-15~中 259	50	75	同生	0.47	0.39	0.43
	港东油田	中 7-67~中 6-68	30	65	同生	0.50	0.36	0.43
	港东油田	港 10-27~港 234	56	60	同生	0.69	0.46	0.58
	港东油田	港 223~港 10-27	75	75	同生	0.23	0.46	0.34
大庆	长春岭气田	长 3~长气 2-4	56	70	非同生	0.35	0.50	0.42
	三站气田	三 2~三 4	20	63	非同生	0.25	0.25	0.25
大庆	汪家屯气田	宋 18~宋 181	18	69	非同生	0.15	0.27	0.21

3.4 断层倾角与埋深

在相同埋深情况下,断层倾角越缓,断面承受的压应力越大,断层裂缝越易闭合^[5],断层封闭的可能性越大;陡角断层增大了油气垂向渗漏的风险性。断层倾角及其它条件相同的断层,埋藏越深,断面所受压力越大,断层封闭性越好,因此,深埋断层的油气垂向渗漏风险减小^[7]。

在上述各参数中,断移地层的砂泥比值是影响断层封闭性的最重要地质因素,断层封闭能力如何,砂泥比值往往起着决定性的作用。

4 应用实例及计算结果分析

根据以上分析,选择了大庆、辽河、大港三个油田的部分断层作为分析对象,取断层的断距、倾角、埋深、断移地层的砂泥比值、断层两盘砂和泥岩层的一般厚度等参数作为地质变量,进行了非线性映射分析,得非线性映射分析判断断层封闭性二维平面图(图2)。

图2中,1~39号为已知封闭性好的断层,49~59号为已知不封闭或封闭能力极差的断层,40~48号和60号断层为被判断封闭性能的断层。

从图2中可见,如果仅将断层封闭性分为封闭与不封闭两类,则两类断层明显分为两个点群,可用分界线将两类断层分开,分界线左侧为不封闭断层,分界线右侧为封闭断层,且自分界线向左,断层封闭性越来越差,向右则越来越好。这与断层的实际封闭情况完全吻合,如在分界

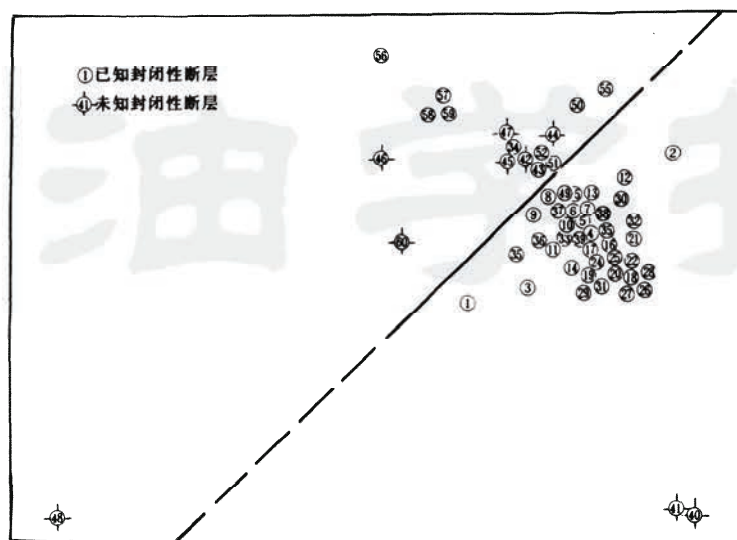


图2 非线性映射分析判断断层封闭性二维平面图

Fig. 2 A 2-dimensional diagram showing the sealing property of the faults by nonlinear mapping analysis

线右侧的26、27、28号断层,位于大庆长垣以东地区的三站气田内,据气藏剖面分析,目的盘的含气井段不含水夹层,该含气层段与断层另一盘含水层段对置,表明断层具有强的封闭能力;35号断层(辽河兴隆台油田兴82—兴209井间断层)目的盘含水层与含油层相互迭置,只有38%的储层含油气,其它储层含水。而在分界线左侧的54号(辽河曙光油田曙1-40-34井—杜88井间断层)和56号(辽河双南油田双92—双91井间断层)断层,断层两盘均含稠油,且具有同一油水界面,表明断层不具任何封闭性。

分析认为,对被判断断层得出的认识是正确的,如落入封闭断层点群一侧的40、41号断层,位于朝阳沟油田,被分析的断层层段是青山口组,本区青山口组为大套泥岩,是大庆长垣以东地区的主要区域性盖层,其厚度为400m以上,而该两条断层的断距分别为25m和15m,远小于泥岩层厚度,即青山口组泥岩层未被错开,断层两盘泥岩层相对置,此种情况下断层是封闭的。实际上,被断层错动的两盘附近,青山口组内仍保存着5~6MPa的孔隙流体超压,说明断层并不作为流体泄压的通道。而位于大庆长垣以东地区的断移上侏罗统的47、48和60号断层均落入了不封闭断层点群一侧,与分析的结论是一致的,该三条断层断移上侏罗统的砂泥比值分别为2.3、20.5和50.0,据前述分析,断层在如此高的砂泥比值层段内不具封闭性。事实上,上侏罗统为本区主要气源岩层,但所发现的天然气多集中在其上覆的白垩系泉三、四段中,而在上侏罗统内却不见天然气聚集,表明断层在油气运聚过程中以通道作用为主。

5 结论

非线性映射分析能很好地反映多种地质因素综合作用的结果,所选择的变量及原始数据的读取不受任何人为因素的影响,且所用样品具重复使用性,是一种可信的断层封闭性判别的

数学地质方法。

参 考 文 献

- [1] 赵鹏大等. 矿床统计预测. 北京:地质出版社,1983.
- [2] 陈发景等. 压实与流体运移. 中国地质大学出版社,1989.
- [3] Smith D A. Theoretical considerations of sealing and nonsealing faults, AAPG Bull. 1966,51:1427.
- [4] Smith D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf coast salt basin, AAPG Bull 1980,64:145~172.
- [5] 陈碧珏. 油矿地质学. 北京:石油工业出版社,1987.
- [6] Weber K J. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth - fault structures, offshore Technology conference, 1978,2643~2653.
- [7] Hrdarding T P. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal block faults at stable flant of foredeep basins and at rift basins. AAPG Bull. 1989,73,(7).

(本文收到日期 1993-03-15)

(修改稿收到日期 1994-04-25)

(编辑 孟伟铭)

EVALUATION OF SEALING ABILITY OF FAULTS USING NONLINEAR MAPPING ANALYSIS

Lu Yanfang Chen Zhangming Chen Fajing

(Daqing Petroleum Institute) (China University of Geosciences)

Abstract

Nonlinear mapping analysis is a mathematical method of "geometric diagram with descended dimensions". The geomatric diagram is transformed from the multidimensional space into a lower dimensional space by nonlinear transform, so as to directly perceive the relationship of the samples in the low dimensional space.

Every factor effecting the sealing ability of fault is regarded as one dimensional coordinate in the multidimensional space, every fault is a point in the multidimensional space. If the sealing abilities are similar, the positions of the faults in the space are close one another. After nonlinear mapping analysis, on the conditions of keeping approximately the geometric relationship among the faults, the multidimensional space can be transformed into a plane. The similar faults in sealing ability are close on the plane.

The faults with sealing abilities known and unknown are simultaneously analysed according to the positions of the evaluated faults on the plane, the sealing abilities of the faults may be accurately evaluated.

Key words nonlinear analysis faults sealing ability