

基于 Hilbert 空间的致密碎屑岩 储层有效裂缝识别方法

潘 斐^{1,2}, 张在旭¹, 明玉坤³

(1. 中国石油大学(华东) 经济管理学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司 企业管理处, 山东 东营 257001; 3. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 裂缝性致密碎屑岩是一种重要的油气储层, 其裂缝发育段识别及预测是研究的关键。研究表明, 主成分分析法在裂缝识别中具有良好的效果。为进一步改进主成分分析法对数据非线性结构处理能力不足的缺陷, 将其拓展到 Hilbert 空间, 利用核函数优化成核主成分分析法, 有效提高了对样本数据的非线性分析能力和提取识别的精确度。对沁水盆地南部地区山西组致密碎屑岩储层有效裂缝进行识别, 主成分 1 和主成分 2 的累积贡献率提高至 94.800%, 较传统主成分分析法提高了 6.240%。运用优化后的核主成分分析法对有效裂缝进行识别, 能够更加有效区分致密碎屑岩储层发育裂缝与不发育裂缝, 同时能够进一步识别未充填裂缝与半充填、全充填裂缝储层, 提高对致密碎屑岩储层有效裂缝的识别精度。

关键词: Hilbert 空间; 核函数; 主成分分析; 非线性; 致密碎屑岩储层; 裂缝

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Identification of effective fractures in tight clastic reservoirs in Hilbert space

PAN Fei^{1,2}, ZHANG Zaixu¹, MING Yukun³

(1. School of Economics and Management, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2. Enterprise Management Department, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Fractured tight clastic rock is an important hydrocarbon reservoir, and identification and prediction of its fracture development section is important. Research indicates that the principal component analysis method is effective in fracture identification. In order to further improve the defect of principal component analysis in dealing with data non-linear structure, the method is projected into the Hilbert space, to form the kernel principal component analysis (kernel PCA) utilizing the kernel function, which effectively improves the ability of non-linear data analysis and the accuracy of data extraction and identification. The effective fractures of the tight clastic reservoir of Shanxi Formation in south Qinshui Basin are identified. The cumulative contribution rate of the principal component 1 and 2 is increased to 94.800%, which is 6.240% higher than that of the traditional principal component analysis (PCA). Using the optimized kernel PCA to identify the effective fractures can more effectively distinguish the fractured stratum and the non-fractured stratum of the dense clastic rock, and can further identify the unfilled, the half-filled, and the full-filled fractured formation, which improves the identification accuracy of the effective fracture in dense clastic rock reservoirs.

Key words: Hilbert space; kernel function; principal component analysis; non-linear; tight clastic rock reservoir; fracture

收稿日期: 2019-11-08。

作者简介: 潘斐 (1982—), 男, 山东济阳人, 在读博士研究生, 从事管理科学和经营管理研究。E-mail: panfeiboy@126.com。

通信作者: 张在旭 (1959—), 男, 山东临朐人, 教授, 博导。E-mail: gljjyglb@126.com。

近年来,随着中外常规油气勘探开发难度的加大,非常规油气已逐渐成为新的勘探领域。致密油继页岩气之后成为全球非常规油气勘探开发的新热点,在全球能源结构中成为重要角色。在致密砂岩、碳酸盐岩以及火山岩等大多数致密储层中,构造裂缝是油气渗流的重要通道和主要储集空间。因此对该类储层有效裂缝分布的准确预测和有效识别对油气勘探具有重要的实践价值^[1-2]。

裂缝的研究方法以岩心观察、测井预测等为主,长久以来岩心观察法是最直接、最有效和最可靠的方式,能够真实反映致密岩性段裂缝特征及分布状态,但受取心技术和取心成本等多重因素的限制,取心井和取心层段十分有限^[3]。测井预测法是利用测井资料开展裂缝研究,由于测井资料包含丰富的裂缝信息,因此利用测井资料进行有效裂缝的识别成为重要的手段^[4-5]。目前能够用于裂缝识别的测井技术包括电阻率测井、声波测井、放射性测井、地层倾角测井、密度测井、补偿中子测井以及电成像、声成像测井等^[6]。其中成像测井可以直观清晰地得到井剖面的裂缝,包括裂缝的产状、有效性、展开程度和延伸情况^[7],但受制于成本较高的客观因素,在实际中可利用和分析的资料相对匮乏。而常规测井资料成本低廉、纵向连续性好而应用广泛。研究表明,裂缝识别的各类测井技术都有各自的优势和局限,单用其中一种方法难以有效解决裂缝识别和评价问题,因此为进一步提高裂缝识别水平,需对多种裂缝识别测井数据进行综合利用^[8-9]。主成分分析法作为降维并综合提取的常用方法,对致密碎屑岩储层有效裂缝的识别已有多年研究,也取得了较多应用效果^[10-12]。但主成分分析法在分析过程中仅对数据的线性结构具有较好的处理效果,对数据的非线性关系无法有效提取分析^[13],导致无法进一步提升裂缝识别的准确度。为此,需将其拓展到更高维空间,在更高维空间中实现数据非线性关系的线性可分。Hilbert 空间是三维空间的一个无限维推广,拓展到 Hilbert 空间可提取到隐含在特征中的一些非线性结构和关系^[14],减少降维分析的信息损失,进一步提升对致密碎屑岩储层有效裂缝识别的精度。通过使用“希尔伯特空间、核函数、核主成分、致密碎屑岩储层、裂缝”等中英文关键词进行组合检索,发现 Hilbert 空间和核函数等技术在致密碎屑岩储层的有效裂缝识别领域研究应用极少,为此,结合沁水盆地南部地区上古生界海陆过渡相致密碎屑岩储层有效裂缝分布的相关研究,运用 Hilbert 空间和核函数等技术对该区开展深入研究,

提高有效裂缝识别精度,以期选取有利勘探目标提供依据。

1 区域地质概况

沁水盆地属于山西台隆的一个负向构造单元。研究区位于沁水盆地的南部,呈现西北低、东南高的变化趋势,自下而上发育前寒武系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系和第四系,其中二叠系包括山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组地层。自中生代印支运动以来,沁水盆地经历了多期构造活动,先后发生了深埋、多期构造旋回及强烈快速隆升剥蚀等构造演化。受多期古构造应力影响,研究区地层断裂发育。其中燕山期受近东西向挤压应力作用,形成了宽缓的 NE 向含煤向斜构造,同时形成了近 NE 和 NNE 向规模较小的正断层。研究区山西组主要发育三角洲平原相,包括以长石石英砂岩和中-粗粒岩屑砂岩为主的分流河道微相、黑色页岩与透镜体砂岩互层的分流间湾微相和灰色-黑色粉砂质页岩、页岩和泥炭为主的沼泽微相,该套地层整体属于陆表海浅水三角洲沉积体系^[15-16]。山西组致密砂岩储层岩性主要为细-中粒长石石英砂岩及石英长石砂岩、岩屑砂岩和砾岩。受强烈压实及复杂的成岩作用影响,储集空间主要为次生孔隙、粒内溶孔、粒间溶孔及微裂缝,孔隙度为 1%~14.5%。受强烈的构造作用和成岩作用等因素影响,研究区裂缝类型及特征非常复杂,以张性缝及剪切缝发育为主,少量发育挤压缝及溶蚀缝^[17]。张性缝、剪切缝、挤压缝及溶蚀缝在致密砂岩中占比分别为 58.5%,28.5%,7% 和 6%,构造裂缝占比大于 90%^[18]。

2 主成分分析法

前期研究结果表明,仅用一种测井技术很难对裂缝进行有效识别,为提高识别精度通常会使用多种测井数据,导致在多维的测井数据中难以对裂缝进行识别评判。主成分分析法是常用的线性特征提取和降维的方法,可以在保留绝大多数样本数据原始信息的基础上,既能降低维度和识别难度^[19],又能进行综合分析^[20],其评价结果真实可靠,在地质勘探中常被重点使用^[21],被证实是一种科学评价方法^[22-23]。其计算方法包括以下步骤。

第一步,构建样本矩阵。设 n 个 p 维样本观察点 $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$, 构成 $n \times p$ 样本矩阵,其表达式为:

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

第二步,对数据进行中心化。其表达式为:

$$\tilde{X} = C_n X \quad (2)$$

其中:

$$C_n = I_n - \frac{1}{n} \mathbf{1}_n^T \mathbf{1}_n \quad (3)$$

第三步,计算协方差矩阵。其表达式为:

$$\Sigma = \frac{1}{n} \tilde{X}^T \tilde{X} \quad (4)$$

第四步,分解协方差矩阵特征值。其表达式为:

$$\Sigma = U \Lambda U^T \quad (5)$$

第五步,计算前 k 个主成分的累积贡献率。选择前 k 个主成分,将原数据由 p 维降为 k 维,其表达式为:

$$L_k = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (6)$$

第六步,计算前 $k(x_i, x_j)$ 个主成分值。其表达式为:

$$F_k = X U_k \quad (7)$$

累积贡献率越大,主成分所包含的原始变量的信息越多。在主成分个数的选取中,一般要使累积贡献率达80%以上,同时也要结合实际进行科学选取,如使用多种测井数据对裂缝进行识别时不好直观体现,可对多维测井数据进行主成分处理,选择前2个主成分将其降为二维,用二维图表直观地表现出识别结果。

3 Hilbert 空间有效裂缝识别方法及建模

3.1 Hilbert 空间

主成分分析法是利用线性投影对数据进行分析降维,对数据中的线性结构能够进行较好的处理。线性方法的基本思路是利用映射矩阵,在特征空间找一个最优分类面将不同样本线性分开。以两类样本数据为例,通过对原始空间混叠的线性结构数据进行线性映射后,可以找到一条直线在特征空间将两类样本分开(图1)。

但是在实际应用中,所要处理的目标数据不可能都由线性函数组合产生,通常呈现出更加复杂和更加抽象的非线性特征,主成分分析法对此类数据的处理效果不理想,在特征空间无法找到分类面将两类样本分开,这也是传统的线性特征提取算法共

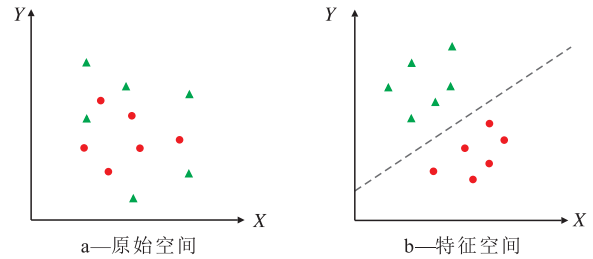


图1 线性可分示意

Fig.1 Diagrams of linear separability

同面临的困难(图2)。

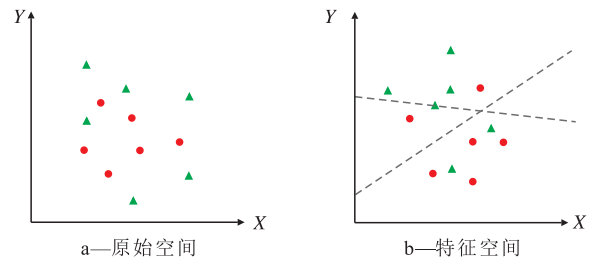


图2 线性不可分示意

Fig.2 Diagrams of linear indivisibility

为得到非线性分界面进行线性投影,需将样本数据映射到更高维空间。Hilbert空间是现实空间的一个无限维推广,在Hilbert空间用线性模型进行分类,实现非线性数据的线性可分(图3)。

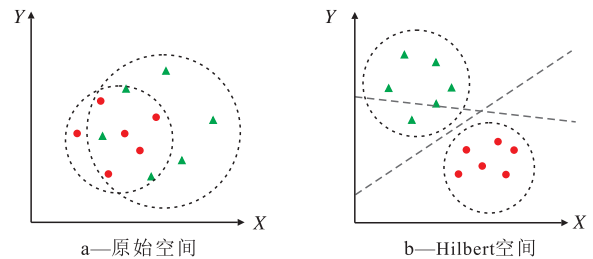


图3 非线性特征提取示意

Fig.3 Diagrams of nonlinear feature extraction

3.2 核函数

在低维空间下线性不可分的数据结构映射到Hilbert空间可实现线性可分,但这种思路会遇见两个难题:一是无法确定什么样的非线性映射适合,因为每个不同具体应用都会有不同适合的非线性映射。二是无法确定非线性映射的形式、函数参数和空间维数等,特别是当映射的Hilbert空间维度过高时,会导致在高维空间运算出现“维数灾难”,引发计算开销过大的致命问题。为解决上述问题,需要找到一种具有通用性的函数替代非线性映射,代替数据在Hilbert空间进行计算,使用核函数是最有效的方法。

核函数就是把向量 x_i 和 x_j 经过非线性映射在非线形空间上的内积用原空间的2个向量的1个函数表示^[24]。其表达式为:

$$k(x_i, x_j) = \langle \Phi(x_i), \Phi(x_j) \rangle \quad (8)$$

常见的核函数还有多项式核:

$$k(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^\alpha \quad (9)$$

在实际计算中可以直接定义一个核函数,由该核函数隐式地定义非线性映射空间。根据核函数原理,使用核函数不需先确定具体映射的形式,因为每给定一个核函数,都能构建一个相关联的特征空间,由给定的核函数表示出此特征空间中的内积。另外在 Hilbert 空间中,每给定一个核函数,特征向量的内积可以通过给定的核函数用原空间中的输入向量直接计算得出,原数据映射到 Hilbert 空间后的计算量不会随空间维数的升高而急剧增加,即可有效避免计算中的“维数灾难”。其计算方法包括以下步骤。

第一步,对样本数据进行非线性变换,得到变换后的样本矩阵:

$$\Phi = (\varphi(x_1), \varphi(x_2), \varphi(x_3), \dots, \varphi(x_n))^T \quad (10)$$

第二步,根据核希尔伯特空间的再生理论,样本点之间的内积可表示为:

$$\varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = k(x_i, x_j) \quad (11)$$

第三步,利用核函数计算样本点内积矩阵:

$$(G)_{ij} = k(x_i, x_j) \quad (12)$$

第四步,通过内积矩阵计算出主成分值,实现非线性结构的线性可分。

3.3 基于核函数的核主成分分析法

通过 Hilbert 空间的映射可解决主成分分析对数据的非线性结构无法处理的缺陷^[25],形成具备线性和非线性处理能力的核主成分分析法^[26]。核主成分分析的核心是利用核函数将样本数据从原始空间映射到 Hilbert 空间,然后对 Hilbert 空间的数据执行主成分分析,从而实现特征提取。其主要原理包括以下步骤。

第一步,计算 $n \times n$ 的 Kernel 矩阵:

$$(K)_{ij} = k(x_i, x_j) \quad (13)$$

第二步,中心化 Kernel 矩阵:

$$\tilde{K} = C_n K C_n \quad (14)$$

第三步,特征值分解:

$$\tilde{K} = U \Lambda U^T \quad (15)$$

第四步,标准化特征向量:

$$\tilde{u}_i = \frac{u_i}{\sqrt{\lambda_i}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (16)$$

第五步,按照累积贡献率大于 80% 的原则,计

算前 $k(x_i, x_j)$ 个主成分值:

$$F_k = K \tilde{u}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (17)$$

4 Hilbert 空间有效裂缝识别对比

4.1 构建目标评价矩阵

在前期研究中,丁文龙等通过对目标地区地质资料的论证分析,建立了基于测井曲线的裂缝识别体系^[27-28]。以该体系为基础,根据岩心裂缝的发育程度,将目标碎屑岩储层中的裂缝分为不发育裂缝、未充填裂缝、半充填裂缝以及全充填裂缝 4 种类型,综合分析各影响因素,甄选横波时差、纵波时差、孔隙度、浅侧向电阻率、自然伽马和密度等 6 条测井曲线进行识别,建立了基于上述 6 条曲线的样本矩阵。

主成分分析法的基本逻辑是样本数据之间具有较强相关性,并非所有数据都适合进行主成分分析。因此在进行主成分分析前,应先进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验和巴特利(Bartlett)球体检验。其中 KMO 检验用于检查变量间的相关性和偏相关性,取值为 0~1,越接近于 1 表示变量间的相关性越强,越适合做主成分分析,效果越好;越接近于 0 越不适合做主成分分析,公认 KMO 值在 0.7 以上适合进行主成分分析。Bartlett 球形检验根据样本数据计算 Bartlett 统计量近似服从卡方分布和自由度(df),根据卡方值和 df 值对照卡方值表来进行判断是拒绝还是不能拒绝,专业统计软件会根据计算所得的卡方值和自由度值自动对照卡方值表提供显著性值,如果显著性值低于 0.05,则拒绝零假设,即样本数据适合做主成分分析。

用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件对样本矩阵进行信效度检验。KMO 值为 0.800; Bartlett 的球形检定值为 1 424.940 卡方, df 值为 15, 对照卡方值表对应的显著性值为 0。按照 KMO 值应大于 0.7 和显著性概率小于 0.05 的原则,说明样本矩阵信效度良好,适合进行主成分降维分析。

4.2 传统主成分分析法的应用分析

对样本矩阵进行传统主成分分析。从表 1 可以看出,主成分 1 的方差贡献率为 75.887%, 主成分 2 的方差贡献率为 12.673%, 前 2 个主成分的累积贡献率为 88.560%, 按照累积贡献率大于 80% 的原则,传统主成分分析法已较好地保留了样本矩阵的相关信息。

表1 样本矩阵主成分分析结果
Table1 PCA results of sample matrix

主成分	特征根(10 ⁵)	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	4.533	75.887	75.887
2	0.760	12.673	88.560
3	0.512	8.532	97.092
4	0.140	2.332	99.424
5	0.029	0.479	99.903
⋮	⋮	⋮	⋮

4.3 基于 Hilbert 空间的核主成分分析

传统主成分分析法得到目标矩阵累积贡献率为 88.560%，损失了 11.440% 的信息，这与主成分分析法作为线性函数无法处理非线性数据的缺陷有直接关系。为此，利用(9)式将主成分分析法拓展到 Hilbert 空间形成多项式核主成分分析法，对样本矩阵进行主成分分析，得样本矩阵映射 Hilbert 空间分析结果(表 2)。

表2 Hilbert 空间样本矩阵核主成分分析结果
Table2 Kernel PCA results of sample matrix in Hilbert space

主成分	特征根(10 ⁵)	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	3.713 3	88.790	88.790
2	0.251 4	6.010	94.800
3	0.073 4	1.760	96.560
4	0.051 2	1.220	97.790
5	0.022 2	0.530	98.320
⋮	⋮	⋮	⋮

评判主成分分析结果优劣的最重要指标是累积贡献率，原始信息损失越少，其分析评价结果越精确科学。从表 2 可以看出，主成分 1 的方差贡献率为 88.790%；主成分 2 的方差贡献率为 6.010%；前 2 个主成分累积贡献率达 94.800%，比传统主成分分析法提高 6.240%，说明原样本数据中非线性的结构和关系被进一步分析，更大程度保留了原样本数据的初始信息，因此基于 Hilbert 空间的核主成分分析对裂缝识别的效果具有更高的精确度和准确率。

4.4 基于 Hilbert 空间的有效裂缝识别结果分析

综上分析表明，基于 Hilbert 空间的核主成分分析能够对样本目标进行有效识别，因此按照核主成分分析的主要步骤，根据(13)——(17)式，对由横波时差、纵波时差、孔隙度、浅侧向电阻率、自然伽马和密度等测井数据构成的样本矩阵计算主成分 1 (P1)和主成分 2(P2)值，以 P1 值为横坐标，P2 值为纵坐标，将计算所得的 P1 和 P2 值进行交汇得研究区有效裂缝识别图版(图 4)，利用该图版可以有效区分不发育裂缝与发育裂缝的储层，不发育裂缝储

层的数据整体呈负相关，发育裂缝储层的数据呈正相关(零星样品因为岩石属性较为类似，数据点存在轻微混杂的现象)。

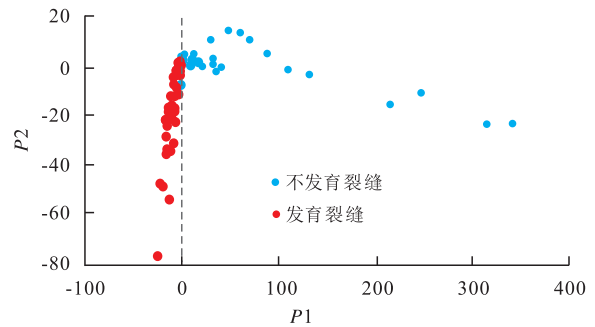


图4 沁水盆地南部地区山西组有效裂缝识别结果
Fig.4 Effective fracture identification result of Shanxi Formation in south Qinshui Basin

在对不发育裂缝与发育裂缝进行识别的基础上，进一步对发育裂缝中的全充填裂缝、半充填裂缝、未充填裂缝进行进一步识别(图 5)。全充填裂缝的储层数据分布集中，具有较高 P2 值，能够与半充填、全充填裂缝有效区分。半充填和全充填裂缝储层的数据较为分散，呈正相关，斜率相近。部分数据存在混杂现象，分析认为由于裂缝开度和裂缝充填程度等差异所致，充填程度高的与全充填裂缝存在混杂现象，充填程度低的与未充填裂缝存在混杂现象。

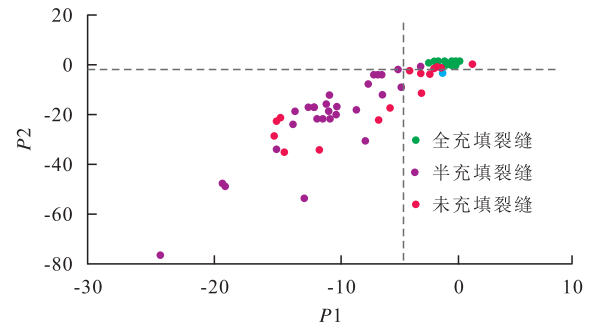


图5 沁水盆地南部地区山西组裂缝充填识别结果
Fig.5 Filled fracture identification results of Shanxi Formation in south Qinshui Basin

5 结论

利用核函数将主成分分析法拓展到 Hilbert 空间形成核主成分分析法，在 Hilbert 空间下主成分分析的非线性处理能力有效加强，进一步实现了对数据信息有效提取和降维分析的目的。利用该方法对研究区致密碎屑岩储层的有效裂缝进行识别，结果表明主成分累积方差贡献率达到了 94.800%，比传统主成分分析法的提高了 6.240%，有效地识别了不同类型的储层裂缝，极大提高了对致密碎屑岩储

层有效裂缝识别的精确度。致密碎屑岩储层有效裂缝识别的验证结果表明,基于更高累积贡献率和更少原始信息损失,在Hilbert空间下核主成分分析的效果更加科学准确。

符号解释

n ——样本观察点的个数,个; p ——样本观察点的维数,维; X ——样本矩阵; C_n ——中心化矩阵; I_n ——列向量行阵; 1_n ——每个分量都是1的列向量; U ——特征向量矩阵; L_k ——前 k 个累积贡献率,%; λ ——主成分方差; $k(x_i, x_j)$ ——主成分数量,个; u ——特征向量; F_k ——前 k 个主成分值; $\Phi(x)$ ——非线性映射函数; $(G)_{ij}$ ——样本点内积矩阵; $(K)_{ij}$ ——Kernel矩阵。

参考文献

- [1] 唐雁刚,张荣虎,魏红兴,等.致密砂岩储层多尺度裂缝渗透率定量表征及开发意义[J].特种油气藏,2018,25(5):30-34.
TANG Yangang, ZHANG Ronghu, WEI Hongxing, et al. Quantitative permeability characterization of multi-scale fractures and its development significance in tight sandstone gas reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 30-34.
- [2] 梅丹,胡勇,王倩.裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献[J].石油实验地质,2019,41(5):769-772.
MEI Dan, HU Yong, WANG Qian. Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5): 769-772.
- [3] 罗群.致密砂岩裂缝型油藏的岩心观察描述——以文明寨致密砂岩为例[J].新疆石油地质,2010,31(3):229-231.
LUO Qun. Core observation and description of tight sandstone fractured reservoir—An example from Wenmingzhai tight sandstone[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 229-231.
- [4] 倪小威,徐观佑,艾林,等.大斜度井/水平井中裂缝的阵列侧向测井响应特性[J].断块油气田,2018,25(3):341-344.
NI Xiaowei, XU Guanyou, AI Lin, et al. Response characteristics of array lateral logging of cracks in highly deviated wells and horizontal wells[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(3): 341-344.
- [5] 韩刚,何峰,张孝珍,等.阵列声波测井在储层裂缝识别中的应用——以鄂尔多斯盆地K区为例[J].油气地质与采收率,2019,26(3):63-69.
HAN Gang, HE Feng, ZHANG Xiaozhen, et al. Application of array acoustic logging to fracture identification: A case study of Area K in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 63-69.
- [6] 张晓峰,潘保芝.二维小波变换在成像测井识别裂缝中的应用研究[J].石油地球物理勘探,2012,47(1):173-176.
ZHANG Xiaofeng, PAN Baozhi. Two-dimensional wavelet transform to identify fractures in imaging logging[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(1): 173-176.
- [7] 孙加华,肖洪伟,么忠文,等.声电成像测井技术在储层裂缝识别中的应用[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3):100-102.
SUN Jiahua, XIAO Hongwei, YAO Zhongwen, et al. Application of acoustoelectric image-forming logging technique in reservoir fracture identification[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(3): 100-102.
- [8] 肖小玲,靳秀菊,张翔,等.基于常规测井与电成像测井多信息融合的裂缝识别[J].石油地球物理勘探,2015,50(3):542-547.
XIAO Xiaoling, JIN Xiujie, ZHANG Xiang, et al. Fracture identification based on information fusion of conventional logging and electrical imaging logging[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(3): 542-547.
- [9] 赖锦,王贵文,孙思勉,等.致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J].地球物理学进展,2015,30(4):1712-1724.
LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [10] 黄力,王安生,王跃祥,等.火成岩岩性识别与物性测井评价——以准噶尔盆地东部石炭系火成岩为例[J].天然气勘探与开发,2018,41(4):23-31.
HUANG Li, WANG Ansheng, WANG Yuexiang, et al. Logging lithological identification and petrophysical property evaluation of igneous rocks: Examples from Carboniferous igneous rocks, eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(4): 23-31.
- [11] 王曙煜,王鹏,张子平,等.基于主成分分析的多属性聚类方法在裂缝预测中的应用[J].油气地球物理,2019,17(1):60-62,67.
WANG Shuyu, WANG Peng, ZHANG Ziping, et al. Multi-attribute clustering method based on principal component analysis and its application in crack prediction[J]. Petroleum Geophysics, 2019, 17(1): 60-62, 67.
- [12] 刘传平,覃豪,杨清山,等.松辽盆地徐家围子断陷沙河子组致密气储层参数解释方法[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):213-221.
LIU Chuanping, QIN Hao, YANG Qingshan, et al. Interpreting method of Shahezi-Formation tight gas reservoir parameters in Xujiaweizi Fault Depression of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 213-221.
- [13] GIROLAMI M. Orthogonal series density estimation and the kernel eigenvalue problem[J]. Neural Computation, 2002, 14(3): 669-688.
- [14] 黄敢基,吕跃进.基于再生核Hilbert空间PCA的属性约简[J].计算机工程,2011,37(10):52-54.
HUANG Ganji, LÜ Yuejin. Dimensionality reduction based on principal component analysis in reproducing kernel Hilbert space[J]. Computer Engineering, 2011, 37(10): 52-54.
- [15] 张学敏,尹帅,史长林.沁水盆地南部山西组致密砂岩裂缝发育特征及控制因素[J].海相油气地质,2018,23(3):43-52.
ZHANG Xuemin, YIN Shuai, SHI Changlin. Developmental characteristics and controlling factors of fractures in tight sandstone of Shanxi Formation, southern Qinshui Basin[J]. Marine Origin Pe-

- troleum Geology, 2018, 23(3): 43-52.
- [16] 尹帅, 丁文龙, 刘建军, 等. 沁水盆地南部地区山西组煤系地层裂缝发育特征及其与含气性关系[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1 855-1 868.
- YIN Shuai, DING Wenlong, LIU Jianjun, et al. Fracture development characteristics and its relation with gas content of Shanxi Formation coal measure strata in southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geosciences, 2016, 27(10): 1 855-1 868.
- [17] 杨克兵, 严德天, 马凤芹, 等. 沁水盆地南部煤系地层沉积演化及其对煤层气产能的影响分析[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 22-29.
- YANG Kebin, YAN Detian, MA Fengqin, et al. Depositional evolution of coalbed and its effect on CBM productivity, southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(4): 22-29.
- [18] 梁建设, 王存武, 柳迎红, 等. 沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1 509-1 519.
- LIANG Jianshe, WANG Cunwu, LIU Yinghong, et al. Study on the tight gas accumulation conditions and exploration potential in Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1 509-1 519.
- [19] 陈杰, 李琼, 范欣然, 等. 利用变频相干技术检测页岩裂缝发育带[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2017, 44(3): 356-361.
- CHEN Jie, LI Qiong, FAN Xinran, et al. Detection of fracture development zone in shale by using discrete frequency coherence cubes[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2017, 44(3): 356-361.
- [20] 潘荣, 朱筱敏, 张剑锋, 等. 基于主成分分析的储层质量综合评价模型——以克拉苏构造带巴什基奇克组为例[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 376-380.
- PAN Rong, ZHU Xiaomin, ZHANG Jianfeng, et al. A model for comprehensive evaluation of reservoir quality based on principal component analysis: A case study of Bashijiqike Formation in Kelasu tectonic zone[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 376-380.
- [21] 周文, 戴建文. 四川盆地西部坳陷须家河组储层裂缝特征及分布评价[J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 20-25.
- ZHOU Wen, DAI Jianwen. The characteristics and evaluation of fractures distribution in Xujiahe formation in the western depression of the Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(1): 20-25.
- [22] 王珂, 张荣虎, 方晓刚, 等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储层特征与属性建模——以库车坳陷克深8气藏为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(6): 87-96.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, FANG Xiaogang, et al. Characteristics and property modeling of ultra-deep fractured-porous tight sandstone reservoir: a case study on the Keshen8 gas reservoir in Kuqa depression[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(6): 87-96.
- [23] 张祥忠, 曹海丽, 赵伦, 等. 主成分分析技术在NWKK油田裂缝预测中的应用[J]. 石油规划设计, 2016, 27(2): 45-47.
- ZHANG Xiangzhong, CAO Haili, ZHAO Lun, et al. Application of principal component analysis technology in fracture prediction of NWKK Oilfield[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2016, 27(2): 45-47.
- [24] 李君宝, 乔家庆, 尹洪涛, 等. 模式识别中的核自适应学习及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- LI Junbao, QIAO Jiaqing, YIN Hongtao, et al. Kernel adaptive learning and application in pattern recognition[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [25] 吴桐雨, 吴少雄. 基于核主成分分析和粒子群优化支持向量机的统计数据缺失值插补[J]. 统计与决策, 2018, 34(8): 21-24.
- WU Tongyu, WU Shaoxiong. Imputation for statistical missing data value based on KPCA and PSO-SVM[J]. Statistics & Decision, 2018, 34(8): 21-24.
- [26] 张瞩熹, 朱熙, 朱少川, 等. 基于核主成分分析的空域复杂度无监督评估[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 236-242.
- ZHANG Zhuxi, ZHU Xi, ZHU Shaochuan, et al. Unsupervised evaluation of airspace complexity based on kernel principal component analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 236-242.
- [27] 丁文龙, 王兴华, 胡秋嘉, 等. 致密砂岩储层裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 737-750.
- DING Wenlong, WANG Xinghua, HU Qiujia, et al. Progress in tight sandstone reservoir fractures research[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 737-750.
- [28] 丁文龙, 尹帅, 王兴华, 等. 致密砂岩气储层裂缝评价方法与表征[J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 173-187.
- DING Wenlong, YIN Shuai, WANG Xinghua, et al. Assessment method and characterization of tight sandstone gas reservoir fractures[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4): 173-187.

编辑 单体珍