



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2023.09.25.02

文章编号: 1674-5086(2025)03-0025-12

中图分类号: TE122

文献标志码: A

# 主成分分析方法识别和评价碳酸盐岩有效储层

徐文圣<sup>1</sup>, 孙耀玺<sup>2,3</sup>, 刘奇广<sup>1</sup>, 庞雄奇<sup>2,3\*</sup>, 张虎<sup>1</sup>

1. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 昌平 102249;

3. 油气资源与工程国家重点实验室, 北京 昌平 102249

**摘要:** 塔西南拗陷柯克亚地区卡拉塔组为碳酸盐岩储层, 其孔隙-裂缝系统决定着油气的富集程度, 应用单一测井参数识别和评价孔-缝系统非常困难且效果差。为此, 以主成分分析方法为核心, 在损失很少信息条件下, 将多个成分耦合后并在保证数据信息丢失最小的原则下提出了一种基于常规测井数据资料对碳酸盐岩孔隙-裂缝系统储集空间解释与评价的新方法, 对未实施成像测井区域实现储层纵向高密度孔隙-裂缝系统联合量化分析与评价。研究利用声波测井、密度测井、中子测井、深侧向测井及浅侧向测井等测井资料, 结合研究区实测孔渗数据及压汞测试等数据, 建立塔西南柯克亚地区次生孔隙-裂缝储层解释数学模型, 量化表征碳酸盐岩孔隙-裂缝系统储集空间。结果表明, 柯克亚卡拉塔组孔隙-裂缝储层解释模型的识别结果与成像测井解释结果吻合率较高, 可达73%, 表明该方法有效, 研究结果可为致密碳酸盐岩油气藏的高效勘探提供有力保障。

**关键词:** 致密碳酸盐岩; 孔隙-裂缝系统; 主成分分析; 储集空间识别; 卡拉塔组

## Interpretation and Identification of Effective Carbonate Reservoir Based on Principal Component Analysis

XU Wensheng<sup>1</sup>, SUN Yaoxi<sup>2,3</sup>, LIU Qiguang<sup>1</sup>, PANG Xiongqi<sup>2,3\*</sup>, ZHANG Hu<sup>1</sup>

1. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China

2. College of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing 102249, China

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Engineering, Changping, Beijing 102249, China

**Abstract:** The Kalataer Formation in the Kekeya Area of the Southwest Tarim Depression is a carbonate reservoir, and its pore-fracture system determines the enrichment degree of oil and gas. It is extremely difficult and ineffective to identify and evaluate the pore-fracture system using a single logging parameter. This paper takes the principal component analysis method as the core, couples multiple components under the condition of minimal information loss, and proposes a new method for interpreting and evaluating the storage space of carbonate rock pore-fracture systems based on conventional logging data, aiming to achieve joint quantitative analysis and evaluation of high-density vertical pore-fracture systems in unimaged logging areas. The logging curve data used in this study include sonic logging curves, density logging curves, neutron logging curves, deep lateral logging curves, and shallow lateral logging curves, combined with measured porosity and permeability data, mercury injection test data, etc., to establish a mathematical model for interpreting secondary pore-fracture reservoirs in the Kekeya Area of the southwest Tarim Depression, quantifying the storage space of the carbonate rock pore-fracture system. The research results show that the identification results of the porous-fractured reservoir interpretation model of the Kalataer Formation in the Kerkeya Area are highly consistent with the interpretation results of the imaging logging, with a matching rate of up to 73%, indicating the effectiveness of the method. The research results can provide a solid guarantee for the efficient exploration of tight carbonate oil and gas reservoirs.

**Keywords:** tight carbonate rock; pore-fracture system; principal component analysis; reservoir space identification; Karatar Formation

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.te.20250115.1022.002>

徐文圣, 孙耀玺, 刘奇广, 等. 主成分分析方法识别和评价碳酸盐岩有效储层[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 25-36.

XU Wensheng, SUN Yaoxi, LIU Qiguang, et al. Interpretation and Identification of Effective Carbonate Reservoir Based on Principal Component Analysis[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 25-36.

\* 收稿日期: 2023-09-25 网络出版时间: 2025-01-15

通信作者: 庞雄奇, E-mail: pangxq@cup.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(ZX20200160)

## 引言

裂缝是储层间沟通的桥梁、油气运移与聚集的通道,直接影响油气的运移及富集<sup>[1-3]</sup>。致密储层表征的一个关键问题是通过裂缝与基质之间的拓扑属性来评估储层的连通性与渗透性。致密碳酸盐岩储层孔隙-裂缝系统的表征十分具有挑战性,岩芯研究、成像测井识别、地震解释、野外露头识别、泥岩发育特征评价、层间裂缝生成与分布的力学参数分析(杨氏模量、泊松比)常用于裂缝的识别和分类<sup>[4-7]</sup>。关于裂缝量化表征方面,一些学者通过核磁共振、扫描电镜和压汞测试来对岩样裂缝进行表征<sup>[8-10]</sup>,此类做法虽能定量表征储层发育情况,但受尺度限制,代表性较为局限,且测试成本高昂;测井数据作为传统的地质研究手段,具有数据纵向密集程度高的特征,然而,不同测井曲线仅仅从单个角度对裂缝进行识别,无法实现复杂碳酸盐岩裂缝的量化表征。近年来,随着井壁成像、井边成像和井间成像等技术的发展,使得储层裂缝的表征更加直观,工程师可以通过微电阻率转化的图像量化表征裂缝几何属性,是表征裂缝的可靠手段,在致密储层厘米—米级尺度裂缝表征具有良好适用性<sup>[11-12]</sup>。但成像测井的缺陷在于测试成本高昂,导致在测井项目中实施比例较低。

为了全面、准确地对复杂致密碳酸盐岩储层物性进行评价,为致密碳酸盐岩的高效勘探开发提供技术支撑,本文选取了声波测井曲线、密度测井曲线、中子测井曲线、深侧向测井曲线、浅侧向测井曲线等常规测井曲线,并选取能够识别并放大次生孔隙-裂缝系统的敏感指标,运用主成分分析法,将各个参数进行耦合,形成一个能够较全面准确表征致密碳酸盐岩次生孔隙-裂缝的指标,并在塔西南柯克亚地区卡拉塔尔组进行验证。

## 1 储层次生孔隙-裂缝识别方法

单项常规测井曲线在识别、解释次生孔隙-裂缝系统存在诸多问题,如在裂缝发育层段,声波测井响应会明显增大并出现“周波跳跃”现象;井径测井曲线往往表现出强烈的振荡扩径并呈现椭圆井眼;深、浅双侧向测井曲线则表现出异常低值<sup>[13]</sup>。柯克亚地区卡拉塔尔组致密碳酸盐岩储层发育次

生孔隙-裂缝系统,具有强烈的非均质性。且经过后期地质作用、流体性质的改造,使得储层类型复杂,裂缝识别困难,单项测井解释无法表征储层孔隙-裂缝发育特征。常规测井解释与处理技术面临有效孔隙解释、定量表征等方面的困难,目前仍缺少行之有效的测井解释与评价方法。基于以上科学问题,本文提出了碳酸盐岩储层次生孔隙-裂缝识别方法<sup>[14]</sup>。

### 1.1 次生孔隙指数

利用双侧向测井可构建次生孔隙表征指数,可识别次生孔隙-裂缝发育程度。其基本原理为深、浅双侧向测井在致密碳酸盐岩层段变化幅度小、裂缝发育层段变化幅度大。次生孔隙指数的一般表征形式为

$$D_S = \lg R_{LLD} - \lg R_{LLS} \quad (1)$$

式中:

$D_S$ —次生孔隙指数,无因次;

$R_{LLD}$ —深侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;

$R_{LLS}$ —浅侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

### 1.2 三孔隙度指数

利用声波、密度及中子测井可构建三孔隙度指数,可识别孔隙及裂缝的发育程度。其基本原理为:中子和密度测井可识别地层的总孔隙度,而声波时差测井可识别地层的原生孔隙度。通过比较总孔隙度与原生孔隙度的差值,实现识别次生孔隙-裂缝的目的。两者差值越大,表明地层次生孔隙-裂缝越发育。三侧向孔隙度指数的一般表征形式为

$$\phi_d = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}} \quad (2)$$

$$\phi_n = \frac{\phi_N - \phi_{Nma}}{\phi_{Nf} - \phi_{Nma}} \quad (3)$$

$$\phi_s = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (4)$$

$$\phi_t = \sqrt{\frac{\phi_d^2 + \phi_n^2}{2}} \quad (5)$$

$$P_{ts} = \frac{|\phi_t - \phi_s|}{\phi_t} \quad (6)$$

式中:

$\phi_d$ —密度测井的孔隙度, %;

$\rho_b$ —岩石密度测井值,  $g/cm^3$ ;

$\rho_{ma}$ —岩石骨架密度测井响应值,  $g/cm^3$ ;

$\rho_f$ —岩石流体密度测井响应值,  $g/cm^3$ ;

$\phi_n$ —中子测井的孔隙度, %;

- $\phi_N$ —岩石中子测井值, %;  
 $\phi_{Nma}$ —岩石骨架中子测井响应值, %;  
 $\phi_{Nf}$ —岩石流体中子测井响应值, %;  
 $\phi_s$ —声波时差测井的孔隙度, %;  
 $\Delta t$ —岩石声波时差测井值,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  
 $\Delta t_{ma}$ —声波时差测井的岩石骨架响应值,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  
 $\Delta t_f$ —岩石流体声波时差测井响应值,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  
 $\phi_t$ —地层总孔隙度, %;  
 $P_{ts}$ —三孔隙度指数, %。

### 1.3 电阻率侵入校正差比

利用有效孔隙发育层段的深、浅侧向电阻率差异可构建电阻率侵入校正差比指数,进而识别储层孔隙、裂缝发育特征。电阻率侵入校正差比指数一般表征形式为

$$R_{SD} = \frac{R_t - R_{LLS}}{R_{LLS}} \quad (7)$$

式中:

- $R_{SD}$ —电阻率侵入校正差比, 无因次;  
 $R_t$ —侵入校正后的地层真电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ , 其计算公式为:  $R_t = 2.589R_{LLD} - 1.589R_{LLS}$ 。

### 1.4 孔隙度测井曲线变化率

由于裂缝发育的随机性和非均质性,裂缝发育层段常对应于测井曲线变化剧烈的地方。通过计算密度、自然伽马和声波时差等高分辨率孔隙度测井曲线变化率,反映次生孔隙-裂缝发育情况。曲线变化率数值越大,表明储层中次生孔隙-裂缝越发育,这也说明测井曲线变化率可用于反映次生孔隙-裂缝的发育程度。孔隙度测井曲线变化率指数的一般表征形式为

$$T = (|T_{i-1} - T_i| + |T_{i+1} - T_i|) / 2 \quad (8)$$

式中:

- $T$ —孔隙度测井曲线变化率, 无因次;  
 $T_i$ —深度点  $i$  处的一种孔隙度测井曲线的响应值, 无因次;  
 $T_{i-1}, T_{i+1}$ —深度点  $i-1, i+1$  处该孔隙度测井曲线的响应值, 无因次。

## 2 基于主成分分析的孔隙识别方法的统计学模型

### 2.1 主成分分析原理

在有效储集空间识别过程中,不同测井曲线具有不同程度的敏感度。主成分分析法基于降维解释

的原理,在损失很少信息的条件下,将多个成分耦合成少个成分,简单且全面地表征各个成分间的相互关系,最终在保证数据信息丢失最小的原则下达到以少数几个新成分来反映原资料的大部分信息的目的<sup>[15]</sup>。主成分分析法的优点在于它是对研究对象所有属性信息进行重组、降噪以提取最具表征能力的成分因子,而不是对原始变量个数进行取舍和选择<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2 SPSS 主成分分析过程评价及孔隙因子的确定

基于上述次生孔隙-裂缝识别方法,运用社会科学统计软件包(Statistical Package for the Social Sciences, SPSS)进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和巴利特球形检验,当 KMO 检测指标大于 0.50 且巴利特球形度检验小于 0.05,表明各次生孔隙-裂缝识别方法之间具有一定的相关性,具备主成分分析的条件。为了保证结果的准确性,需要对各个识别方法进行归一化处理(此步可通过 SPSS 自动操作),然后利用 SPSS 因子分析功能中的降维操作,选取主成分分析方法输出结果,得出研究区卡拉塔尔组主成分方差贡献率(表 1)。

表 1 研究区卡拉塔尔组方差贡献率  
Tab. 1 Variance contribution rate of Karatar Formation in the study area

成分	初始特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.04	51.00	51.00
2	1.20	30.00	81.00
3	0.63	15.75	96.75
4	0.13	3.25	100.00

一般而言,主成分对应的初始特征值应大于 1.00 且累计方差贡献率大于 80.00%,由此可知上述 4 种识别方法可形成两个主成分,且这两个主成分可表征 4 类识别方法中 81.00% 的信息,表征效果良好。对上述两个主成分进行成分矩阵分析,结果(表 2)显示,成分 1 主要反映电阻率侵入校正差比(0.94)与次生孔隙度指数(0.94);成分 2 主要反映测井曲线变化率(0.88)与三孔隙度指数(0.62)。

表 2 研究区卡拉塔尔组主成分矩阵  
Tab. 2 Component matrix of Karatar Formation in the study area

识别方法	成分 1	成分 2
电阻率侵入校正差比	0.94	-0.14
次生孔隙度指数	0.94	-0.14
测井曲线变化率	-0.06	0.88
三孔隙度指数	0.52	0.62

在主成分评价结果中,各成分系数求取的一般方法为各个识别方法的评价指标(表 2)与对应的特

征值的平方根(表 1)的比值。例如,研究区卡拉塔尔组成分 1 中电阻率侵入校正差比对应的系数计算结果为  $0.94/\sqrt{2.04} = 0.66$ , 基于此类方法, 依次计算两个主成分的评价关系式

$$Y_1 = 0.66R_{SD} + 0.66D_S - 0.04T + 0.36P_{ts} \quad (9)$$

$$Y_2 = -0.13R_{SD} - 0.13D_S + 0.80T + 0.57P_{ts} \quad (10)$$

式中:

$Y_1$  一次生孔隙-裂缝评价第一主成分, 无因次;

$Y_2$  一次生孔隙-裂缝评价第二主成分, 无因次。

由表 1 可以看出, 成分 1 占全部参数信息的 51.00%、成分 2 占全部参数信息的 30.00%, 因此, 次生孔隙-裂缝参数的表达式为

$$Y = 0.51Y_1 + 0.30Y_2 \quad (11)$$

式中:  $Y$  一次生孔隙-裂缝分布指数(孔缝因子), 无因次。

基于孔缝因子, 可计算出不同埋深状况下次生孔隙-裂缝发育情况, 次生孔隙-裂缝越发育, 其孔缝因子越大。

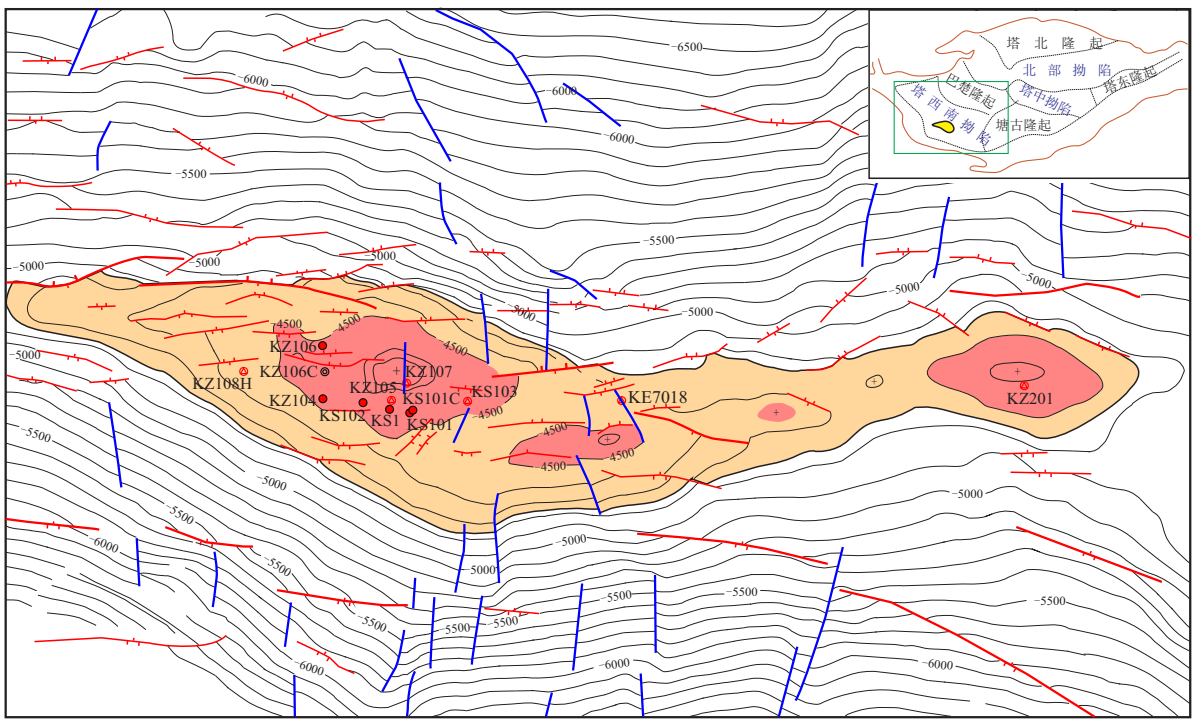
### 3 实例研究

以柯克亚地区(研究区)卡拉塔尔组碳酸盐岩

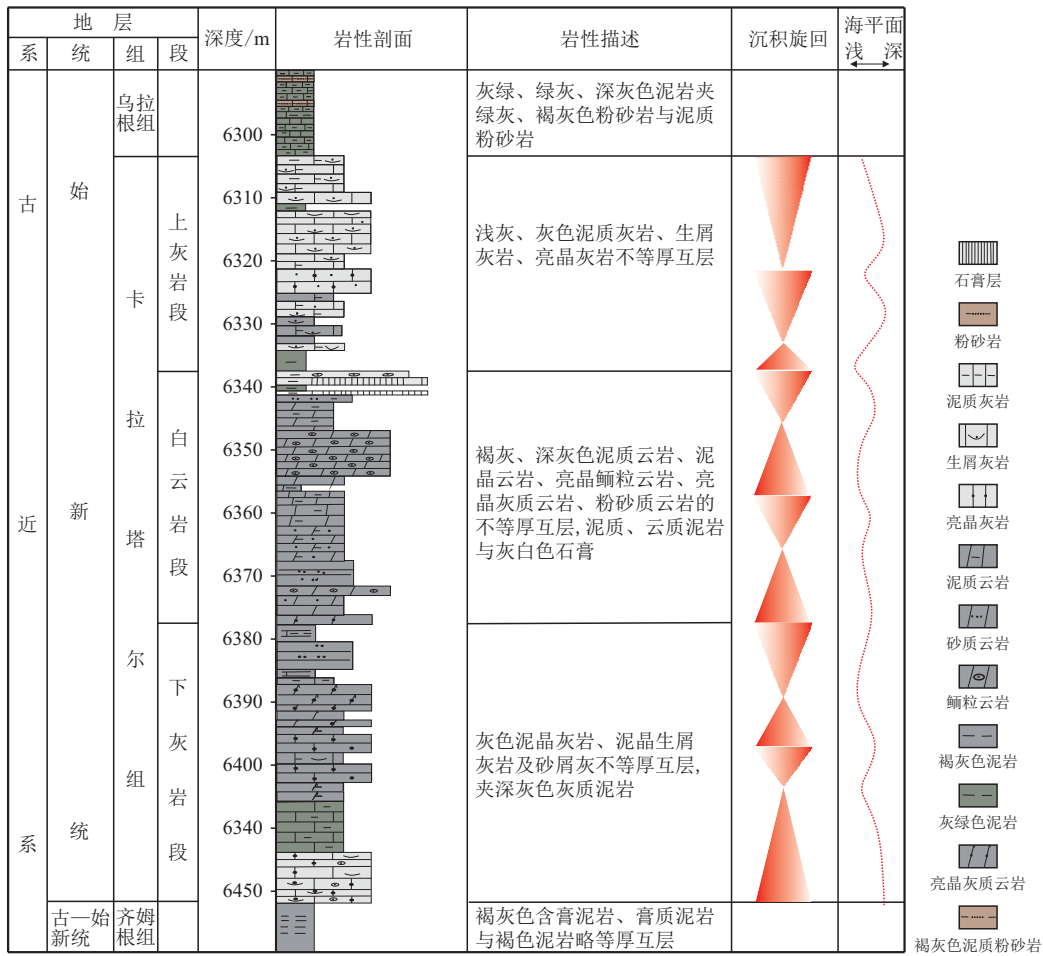
为例进行研究。柯克亚地区位于塔里木盆地西南部, 古近系卡拉塔尔组发育典型的致密碳酸盐岩储层, 储层发育孔隙-裂缝系统<sup>[18]</sup>, 是研究碳酸盐岩孔隙-裂缝系统表征方法的良好模型。

自 1977 年 K1 井发现工业油气流以来, 研究区卡拉塔尔组碳酸盐岩层段相继发现 KS1 井(日产气 509 376 m<sup>3</sup>)、KS101 井(日产气 133 799 m<sup>3</sup>)、KS102(日产气 520 943 m<sup>3</sup>)等高产井, 标志着该组致密碳酸盐岩具有良好的勘探开发前景。然而, 通过近年来对高产井周边地区进一步勘探, 发现研究区卡拉塔尔组致密碳酸盐岩油气藏具有一井一藏的特征, 迫切需要对研究区卡拉塔尔组碳酸盐岩储层孔隙-裂缝发育特征进行重新认识。

研究区卡拉塔尔组受近南向北走滑断裂控制, 发育长短轴比近 3:1、构造走向呈近东向西的短轴背斜构造, 有 3 个构造高点, 分别位于 KZ107 井、KE7018 井及 KZ201 井周缘(图 1a)。柯克亚地区位于塔西南拗陷, 其含气层系可以分为上、中、下 3 套; 上部含气层系为受构造-岩性控制的碎屑凝析气藏, 由 1977 年 K1 井井喷发现。中部含气层系为一套碳酸盐岩凝析气藏(图 1b), 由 1991 年 KS1 井井喷发现。下部含气层系为白垩系<sup>[19-22]</sup>。



a 研究工区构造等值线图



b 典型井综合柱状图

图 1 研究区基本概况

Fig. 1 Basic overview in the study area

### 3.1 致密碳酸盐岩储层特征

#### 3.1.1 岩性、物性特征

矿物发育特征是研究储层的基础, 其控制着次级裂缝发育<sup>[23]</sup>。矿物、孔隙和有机质的共存导致了储层的非均质性与各向异性, 同时也说明了矿物对储层基本特征具有控制作用。

研究区卡拉塔组主要发育灰岩与白云岩, 具体发育泥晶云岩(31.0%)、亮晶砂屑云岩(12.8%)、亮晶鲕粒云岩(13.8%)、亮晶粒屑云岩(14.9%)、亮晶生屑云岩(6.4%)、泥晶灰质云岩(4.3%)和灰岩(6.4%)等(图 2); 其中, 上灰岩段主要发育砂屑灰岩、粉砂质生屑灰岩和生屑泥晶灰岩等; 白云岩段主要发育亮晶鲕粒云岩、亮晶砂屑云岩及亮晶砂屑鲕粒云岩等; 下灰岩段主要发育砂屑泥晶灰岩、泥晶生屑砂屑灰岩及泥晶生屑灰岩等。泥晶云岩、亮晶砂屑云岩、亮晶鲕粒云岩和亮晶粒屑云岩超过全井段储集岩类的 70%。

对研究区卡拉塔组 262 个孔隙度与渗透率岩芯测试数据进行分析发现, 卡拉塔组碳酸盐岩孔隙度在 0~10.00%, 平均孔隙度 1.90%, 对应渗透率分布范围相对较广, 在  $10^{-5}$ ~ $10^3$  mD, 平均渗透率 1.820 mD, 孔隙度与渗透率相关性较差, 表明次生孔隙-裂缝可能是影响储层孔渗发育的关键因素。对不同岩性储层进行分析, 其中, 白云岩段平均孔隙度为 2.40%、渗透率为 0.380 mD; 灰岩段平均孔隙度为 0.71%、渗透率为 0.078 mD, 孔隙度分布特征为“双峰”形态(图 3a), 表明研究区可能发育两类性质不同的储层。两类储层临界孔隙度约为 3.50%, 临界渗透率约为 0.010 mD(图 3b); 以孔隙度 3.50%、渗透率 0.010 mD 为界限, 建立实测孔隙度-渗透率关系图, 由图 3c 及图 3d 可知, 卡拉塔组孔隙度主要发育低孔-高渗型储层, 根据深层碳酸盐岩成岩演化特征, 判断其属于次生孔隙-裂缝改造型。

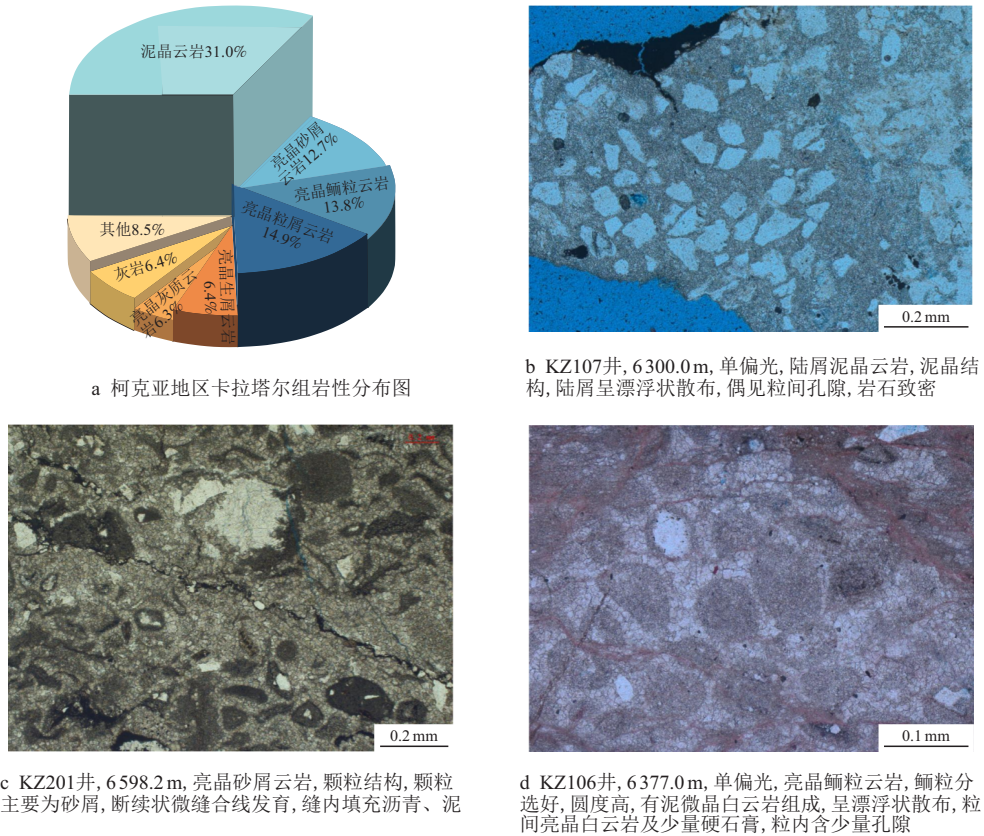


图 2 研究区储层岩性图及典型镜下薄片照片

Fig. 2 Reservoir lithology and typical microscopic slice photos in the study area

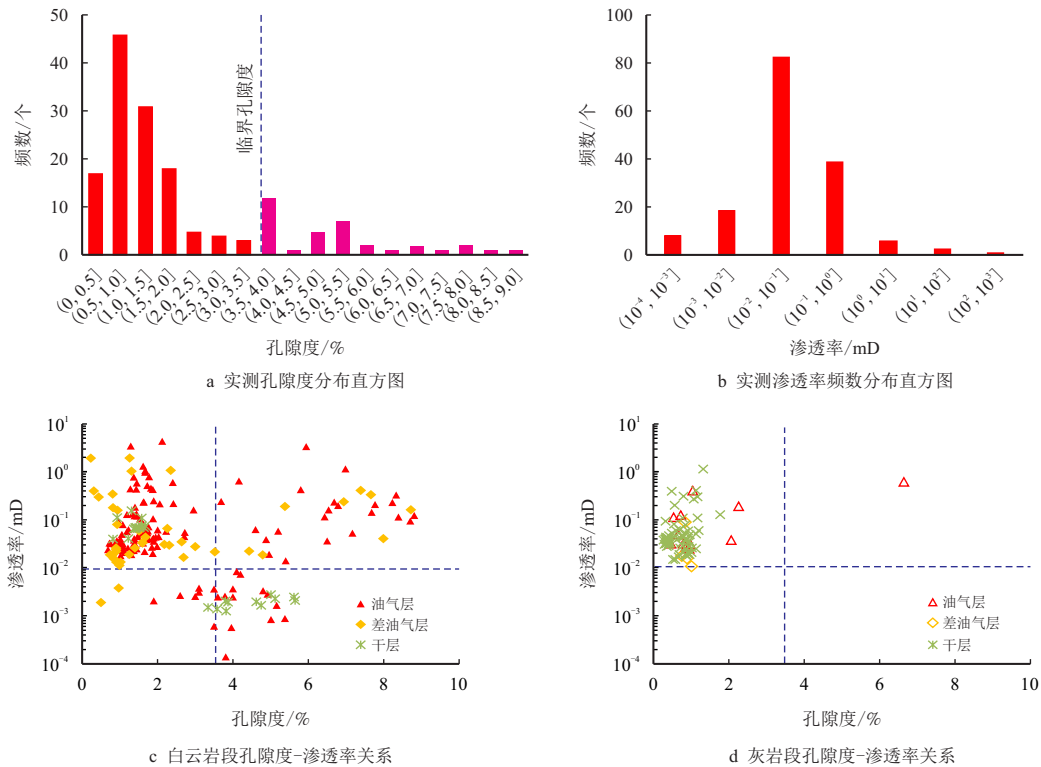


图 3 研究区卡拉塔尔组孔渗发育特征

Fig. 3 Pore and permeability development characteristics of Karatar Formation in the study area

研究区卡拉塔组碳酸盐岩储层致密, 孔隙度小, 平均孔隙度仅 1.9%, 储层非均质性强, 导致储层孔喉结构表征困难大。孔喉结构主要包括孔隙及喉道大小、形状样式、分布特征及相互联通关系, 是研究储层孔隙-裂缝发育特征最为关键的指标之一<sup>[9, 24]</sup>。基于此, 对拉塔组典型样品进行压汞法

毛细管分析, 由图 4 可知, 孔喉半径与其分布频数、平均渗透率贡献值均呈现“双峰”形态, 表明研究区存在两种不同的储集空间, 其中, 储集空间较小的储层对应的孔喉半径在 0.004~0.040 μm; 储集空间较大的储层对应的孔喉半径在 0.063~0.630 μm; 证实研究区存在次生孔隙-裂缝型储层。

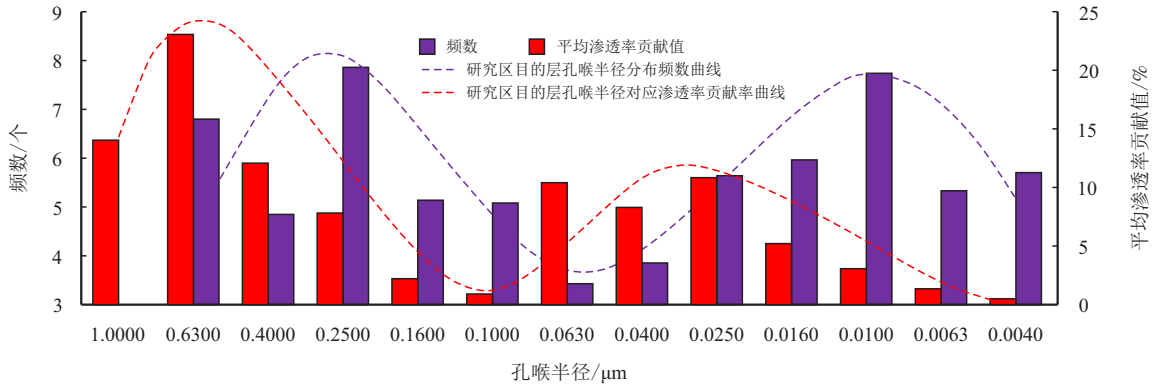


图 4 研究区卡拉塔组孔喉半径分布图

Fig. 4 Distribution of pore throat radius of Karatar Formation in the study area

3.1.2 孔隙-裂缝系统特征

碳酸盐岩因成分不稳定, 易被溶解, 其储集空间极易受沉积环境、构造应力及流体性质等影响, 形成多种储层类型<sup>[25-26]</sup>。研究区卡拉塔组因受同生期大气淡水溶蚀作用、埋藏溶蚀作用、岩石颗

粒间不整合接触、变形及压溶作用形成各类储集空间<sup>[27]</sup>。对研究区典型井成像测井系统观察, 清楚识别井筒侧壁的裂缝特征, 通过与岩芯结合观察识别, 发现卡拉塔组广泛发育次生孔隙、裂缝, 形成裂缝型、孔隙型和孔隙-裂缝型储层(图 5)。

储层类型	典型井	取芯井段/m	岩性	岩芯	成像图
					方位/(°)
					0 180 360
裂缝型	KZ106井	6387~6389	浅灰色白云岩		
孔隙-裂缝型	KS103井	6306~6311	深褐色灰岩		
孔隙型	KE7018井	6425~6431	浅褐色灰岩		

图 5 研究区卡拉塔组岩芯裂缝图

Fig. 5 Core fracture diagram of Karatar Formation in the study area

### 3.2 裂缝解释与识别

依托现有地质及地球化学资料, 基于三孔隙度指数、测井曲线变化率、次生孔隙度指数、电阻率校正差比及孔隙度测井曲线变化率等多种孔缝识别方法识别并放大研究区目的层孔隙和裂缝, 并采用主成分分析法, 耦合建立适用于研究区的次生孔隙-裂缝识别指标——孔缝因子, 孔缝因子越大, 则表明储层次生孔隙-裂缝越发育。对研究区卡拉塔尔组典型井(KS103 井)进行连续定量识别(图 6), 可以看出, 孔缝因子与孔缝识别指标相关性较好, 表明可用此指标综合标志储层孔隙及裂缝发育情况。

为了交叉验证指标的可靠性, 采用常规测井解释、成像测井解释与孔缝因子综合解释对比分析, 结果如图 6 所示。图中 6 360~6 400 m 层段为前人依托成像测井解释成果及常规测井解释结果, 对比

孔缝因子解释成果可以看出, 孔缝因子较常规测井在解释孔渗发育特征具有一定的优越性。其解释结果与电成像测井解释结果有良好的对应关系, 且裂缝发育良好层段, 其孔缝因子较大, 反之则较小。总体上, 随着储集空间性能的减弱, 其孔缝因子也逐渐减小。可见孔缝因子可有效识别储层孔隙、裂缝发育特征。

基于此, 依托研究区数口钻井测井基本资料, 采用主成分分析方法对研究区卡拉塔尔组上灰岩段、白云岩段及下灰岩段的孔隙和裂缝发育情况进行预测, 并分别绘制研究区卡拉塔尔组 3 个不同层段碳酸盐岩的平均孔缝因子曲线(图 7)。将解释结果与成像测井解释结果进行对比可以发现, 孔缝因子指数与各单井裂缝数量有良好的依存度, 证明了该方法的可靠性(图 8)。

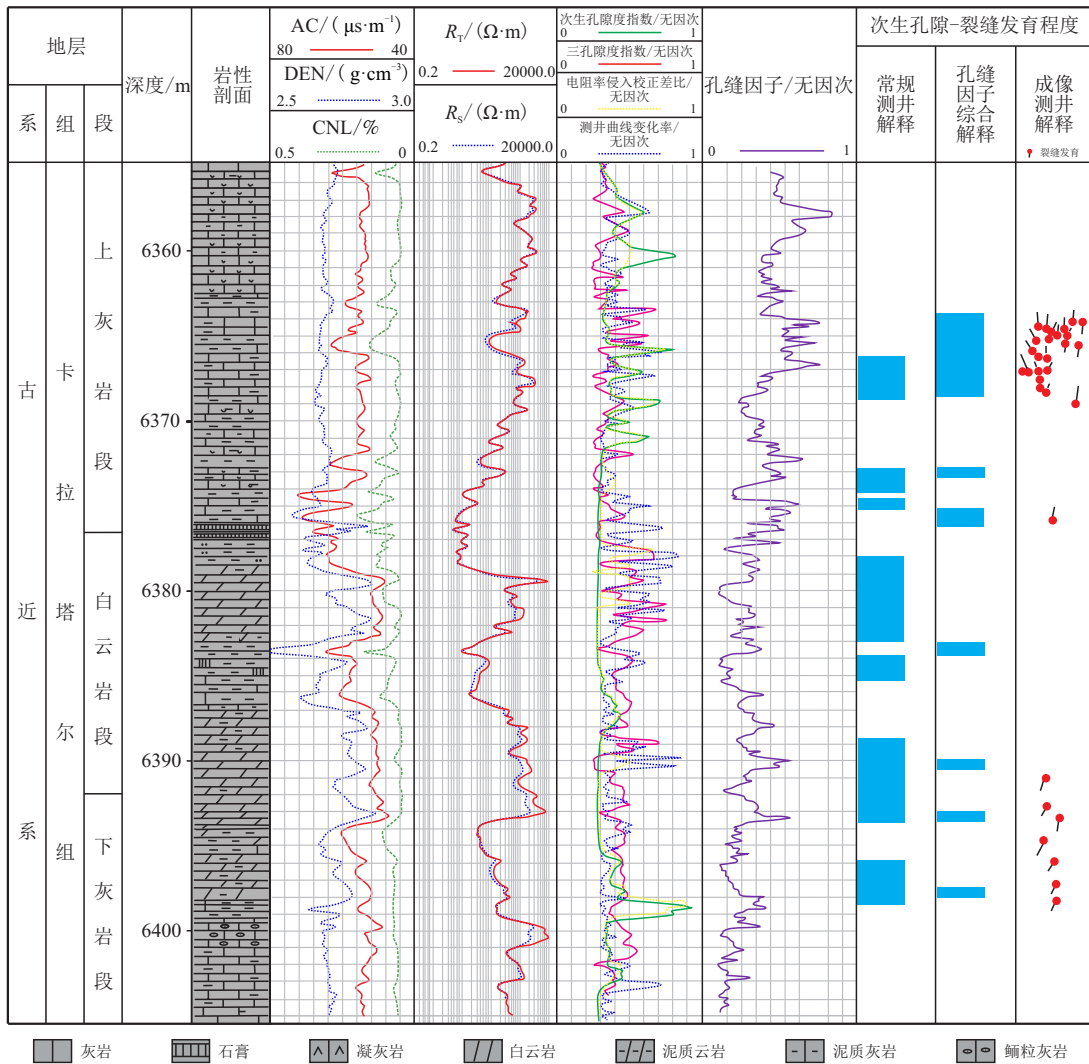
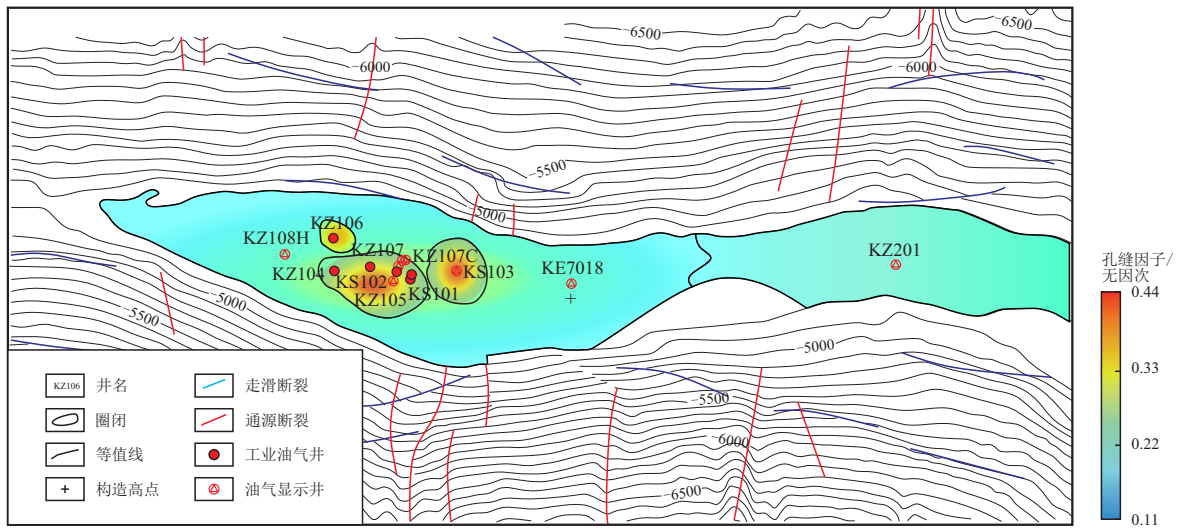
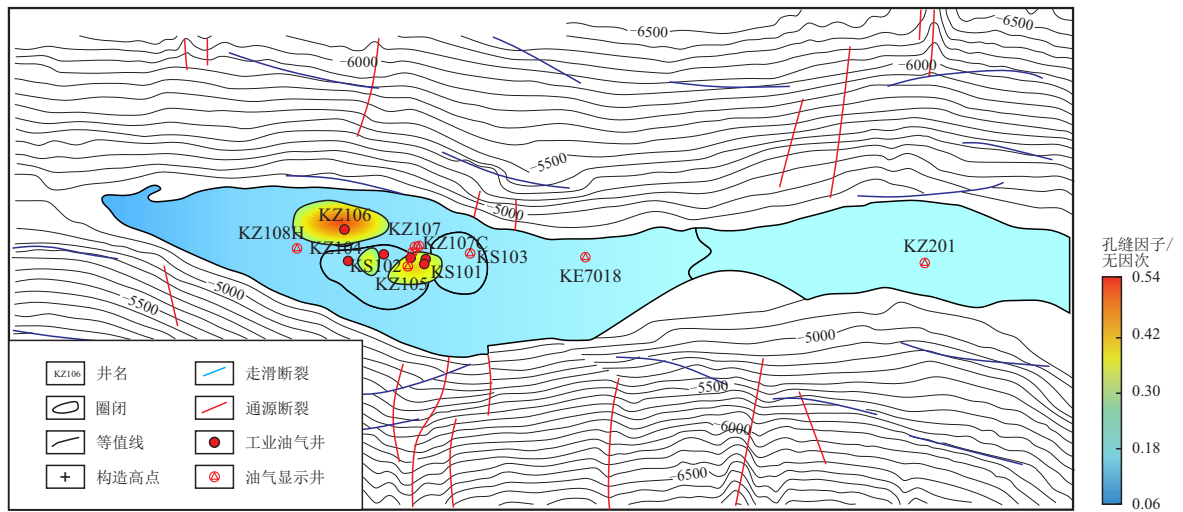


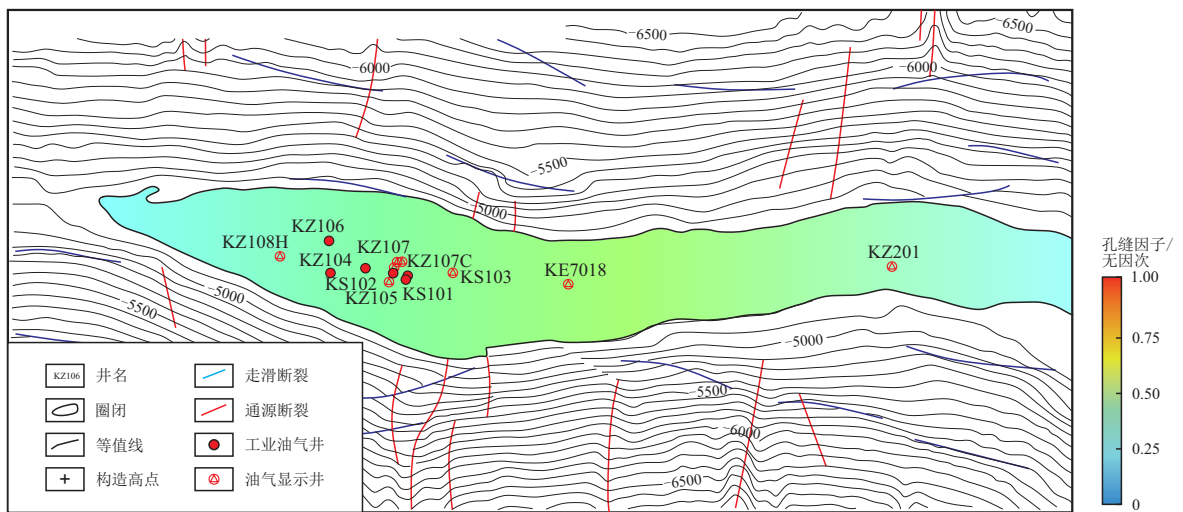
图 6 孔缝因子及成像测井对比图  
Fig. 6 Comparison of hole fracture factor and imaging logging



a 上灰岩段



b 白云岩段



c 下灰岩段

图 7 研究区卡拉塔尔组不同层段孔缝因子平面分布图

Fig. 7 Plane distribution of pore factor in different layers of Karatar Formation in the study area

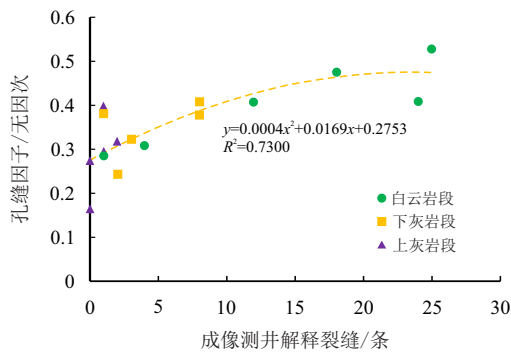


图8 研究区卡拉塔组不同层段孔缝因子与成像测井解释裂缝数的关系

Fig. 8 Relationship between pore factor and the number of fractures interpreted by imaging logging in different layers of Karatar Formation in the study area

## 4 结论

1) 使用次生孔隙度指数、三孔隙度指数、电阻率侵入校正差比及测井曲线变化率可放大储层孔隙-裂缝敏感参数,可以较好地识别储层空间发育情况。

2) 利用主成分分析法可将孔隙裂缝识别方法形成一个表征致密碳酸盐岩次生孔隙-裂缝的指标,可弥补单一参数难以准确识别次生孔隙-裂缝的缺陷。

3) 柯克亚地区卡拉塔组储层岩性以白云岩及灰岩居多,以泥晶云岩、亮晶砂屑云岩、亮晶鲕粒云岩及亮晶粒屑云岩为主。受沉积环境、构造应力和流体性质等影响,柯克亚地区卡拉塔组以裂缝型、孔隙型和裂缝-孔隙型储层为主。

4) 主成分分析法确定的孔缝因子越大,储层储集空间发育程度越好,该指标与成像测井解释结论依存度较高,决定系数达73%;实现了利用常规测井信息对次生孔隙-裂缝的快速识别和准确评价。

## 参考文献

- [1] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
YUAN Shiyi, SONG Xinmin, RAN Qiquan. Fractured reservoir development technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [2] 靳军, 鲜本忠, 连丽霞, 等. 晚期快速埋藏过程中微裂缝对深层不同成岩强度碎屑岩储集层的改造作用——来自准噶尔盆地南缘白垩系清水河组成岩物理模拟的启示[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 309–321. doi: 10.11698/PED.20220337
- [3] 崔裔瞳, 王祝文, 徐方慧, 等. 基于斯通利波及电成像测井数据对火成岩裂缝地层的特征分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 624–632. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210125
- [4] 商琳, 戴俊生, 冯建伟, 等. 砂泥岩互层裂缝发育的地层厚度效应[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 35–41. doi: 10.7657/XJPG20150107
- [5] 王建华, 张金森, 吴国忱. 宽方位杨氏模量反演和裂缝预测方法及应用——以渤中凹陷H构造潜山勘探为例[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 593–602. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.03.018
- [6] 岳喜伟, 戴俊生, 王珂. 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响[J]. 地质力学学报, 2014, 20(4): 372–378. doi: 10.3969/j.issn.1006-6616.2014.04.005
- [7] 赵东东, 王旭龙, 周印明, 等. 基于泊松方程的空间波数混合域二度体磁异常数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 592–601. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210008
- [8] 刘宣威, 田亚铭, 张慧, 等. 川北地区中二叠统茅二

- 段储层特征及控制因素分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(4): 463–468. doi: 10.6056/dkyqt202204005
- LIU Xuanwei, TIAN Yaming, ZHANG Hui, et al. Reservoir characteristics and control factors of the second member of the Middle Permian Tongmao Formation in northern Sichuan[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(4): 463–468. doi: 10.6056/dkyqt202204005
- [9] 吴春燕, 展转盈, 李文厚, 等. 联合压汞法表征致密油储层孔喉特征: 以陕北定边地区延长组长7段为例[J]. 地质科学, 2023, 58(2): 710–722. doi: 10.12017/dzqx.-2023.041
- WU Chunyan, ZHAN Zhuanying, LI Wenhou, et al. The combination methods of mercury intrusion to characterize pore-throat characteristics in tight oil reservoir: A case study of Yanchangzu Chang 7 reservoir in Dingbian Area of Shanbei[J]. Chinese Journal of Geology, 2023, 58(2): 710–722. doi: 10.12017/dzqx.2023.041
- [10] 袁红旗, 邓馨雨, 杜会尧, 等. 柳江盆地二叠系山西组露头致密砂岩储层非均质性表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 468–479. doi: 10.11743/ogg2023-0217
- YUAN Hongqi, DENG Xinyu, DU Huiyao, et al. Characterizing the heterogeneity of tight sandstone in outcropped Permian Shanxi Formation, Liujiang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 468–479. doi: 10.11743/ogg2023-0217
- [11] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Qixuan, et al. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(3): 913–957. doi: 10.1007/s10712022097054
- [12] LAI Jin, LIU Shichen, XIN Yi, et al. Geological-petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(11): 2263–2296. doi: 10.1306/03122119135
- [13] 李曦宁. 缝洞型储层综合测井评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- LI Xining. Study on integrated logging evaluation of the fractured-vuggy reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [14] 曹继飞, 邹德永, 舒腾飞, 等. 基于主成分分析的碳酸盐岩裂缝识别方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15421–15428.
- CAO Jifei, ZOU Deyong, SHU Tengfei, et al. Fracture identification in carbonate rock based on principal component analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15421–15428.
- [15] 沈禄银, 潘仁芳, 谢冰, 等. 多信息融合的页岩油储层自动分层技术[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 110–116. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2016.05.0015
- SHEN Luyin, PAN Renfang, XIE Bing, et al. Automatic of shale oil with multiple information[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5): 110–116. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2016.05.0015
- [16] 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组为例[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 376–380. doi: 10.11781/sydz201403376
- 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 Bashijiqik Formation in Kelasu tectonic zone[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 376–380. doi: 10.11781/sydz201403376
- [17] 张强, 李家金, 王毛毛, 等. 基于改进主成分分析的测井曲线岩性分层技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1369–1376. doi: 10.13278/j.cnki.-jjuese.20210265
- ZHANG Qiang, LI Jiajin, WANG Maomao, et al. Logging curve rock layering technology based on improved principal component analysis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1369–1376. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210265
- [18] 刘太勋, 徐怀民, 焦翠华. 柯克亚气田古近系凝析气藏储层特征[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 18–20. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2007.04.006
- LIU Taixun, XU Huaimin, JIAO Cuihua. Reservoir characteristics of Paleogene condensate gas pools in Kekeya Gas Field, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 18–20. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2007.04.006
- [19] 钟治奇. 柯克亚古近系卡拉塔尔组碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- ZHONG Zhiqi. Carbonate diagenesis and pore evolution of the Karatal Formation in the Kekeya Paleogene[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [20] 戴俊生, 王宇坤, 冯建伟, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝特征及形成期次[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(2): 133–136. doi: 10.7657/XJPG20170202
- DAI Junsheng, WANG Yukun, FENG Jianwei, et al. Characteristics and formation periods of fractures in ordovician carbonate rocks in Hetianhe Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(2): 133–136. doi: 10.7657/XJPG20170202
- [21] 廖晓, 王震亮, 范昌育, 等. 低勘探程度地区烃源岩综合评价——以塔里木盆地西南拗陷石炭系烃源岩为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 261–267. doi: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.201802016
- LIAO Xiao, WANG Zhenliang, FAN Changyu, et al. The comprehensive evaluation of source rock in low-exploration area: A case study on the Carboniferous source rock in southwest sag of Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(2):

- 261–267. doi: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.201802016
- [22] LI Maowen, LIN Renzi, LIAO Yongsheng, et al. Organic geochemistry of oils and condensates in the Kekeya Field, southwest depression of the Tarim Basin (China)[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(1): 15–37. doi: 10.1016/S0146-6380(98)00201-0
- [23] 赖富强, 李仕超, 王敏, 等. 济阳坳陷页岩油储层矿物组分最优化反演方法[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 16–23. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2022.02.003  
LAI Fuqiang, LI Shichao, WANG Min, et al. Optimal retrieval method for mineral constituents of shale oil reservoirs in Jiyang Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 16–23. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2022.02.003
- [24] 董鑫旭, 孟祥振, 蒲仁海. 基于致密砂岩储层孔喉系统分形理论划分的可动流体赋存特征认识[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 78–90. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.03.008  
DONG Xinxu, MENG Xiangzhen, PU Renhai. Occurrence characteristics of movable fluids based on the division of pore throat system in tight gas reservoir by fractal theory[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 78–90. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.03.008
- [25] 樊太亮, 高志前, 吴俊. 塔里木盆地深层碳酸盐岩建造-改造作用与多类型储层有序性分布[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 1–18. doi: 10.13745/j.esf.sf.2023.6.5  
FAN Tailiang, GAO Zhiqian, WU Jun. Formation and modification of deep-burial carbonate rocks and orderly distribution of multi-type reservoirs in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 1–18. doi: 10.13745/j.esf.sf.2023.6.5
- [26] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691–698.  
LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng–Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691–698.
- [27] 杨红强, 王振宇, 周成刚, 等. 柯克亚气田古近系卡拉塔组碳酸盐岩成岩作用及孔隙形成[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12(3): 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1673-1980.2010.03.005  
YANG Hongqiang, WANG Zhenyu, ZHOU Chenggang, et al. Carbonate diagenesis and porosity formation of Kataer

Formation (Tertiary) in Kekeya Gas Field, Tarim Basin[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2010, 12(3): 14–17. doi: 10.3969/j.issn.-1673-1980.2010.03.005

## 作者简介



徐文圣, 1982 年生, 男, 汉族, 四川西昌人, 高级工程师, 博士, 主要从事油气田开发方面的研究工作。  
E-mail: 1569266080@qq.com



孙耀玺, 1998 年生, 男, 汉族, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要从事油气层形成机制与分布规律研究。  
E-mail: 616933786@qq.com



刘奇广, 1995 年生, 男, 汉族, 河北衡水人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田开发方面的研究工作。  
E-mail: 1569266080@qq.com



庞雄奇, 1961 年生, 男, 汉族, 湖北崇阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事油气藏形成机制与分布规律、油气资源评价与油气田勘探的教学与科研工作。E-mail: pangxq@cup.edu.cn



张虎, 1995 年生, 男, 汉族, 山东曹县人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田开发等方面的研究工作。  
E-mail: upczhanghu@163.com

编辑: 张云云

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>