

# 哈萨克斯坦北特鲁瓦油田石炭系 碳酸盐岩储层测井评价

侯珏<sup>1</sup>,林雅平<sup>1</sup>,赵文琪<sup>1</sup>,罗曼<sup>1,2</sup>,李建新<sup>1</sup>,王淑琴<sup>1</sup>

1 中国石油勘探开发研究院中亚俄罗斯研究所; 2 中国石油国际勘探开发有限公司

**摘要** 哈萨克斯坦北特鲁瓦油田石炭系碳酸盐岩储层受沉积作用、构造作用和差异成岩作用等影响,储层岩性复杂、储集空间多样、基质物性较差、测井响应复杂,使得该类储层在岩性识别、储层参数计算和流体性质识别等方面遇到了许多困难。针对北特鲁瓦油田复杂碳酸盐岩储层测井评价中存在的问题,在大量岩心观察、薄片分析的基础上,通过碳酸盐岩储层最优化测井解释方法,对碳酸盐岩储层的矿物组分进行可靠识别,进而计算得到准确的岩性剖面。基于取心、成像测井资料,建立孔隙、裂缝双重介质解释模型,结合不同储集空间类型储层的测井响应特征,对各类储集空间进行精细识别及分类。根据储层储集空间组合特征与孔渗关系,把储层划分为孔隙缝复合型、孔隙缝孔型、孔隙型、孔洞型、裂缝型等5类,基于储层分类开展了储层定性、定量评价方法和理论的研究,建立了储层参数计算模型,得出一套较为完善的复杂碳酸盐岩储层测井评价方法。

**关键词** 碳酸盐岩储层; 测井评价; 孔渗关系; 储集空间组合; 孔隙结构; 石炭系; 北特鲁瓦油田

中图分类号:TE122.2 文献标识码:A

## 0 前言

碳酸盐岩储层在全球油气生产中占有极其重要的地位,其油气产量约占世界油气总产量的60%<sup>[1]</sup>。随着国内广泛分布的陆相碎屑岩油气田进入开发后期,海外海相碳酸盐岩油气田勘探开发成为重点。碳酸盐岩储层储集空间复杂多样、储层非均质性较强<sup>[2]</sup>,使储层测井综合评价难度增大。针对复杂碳酸盐岩储层测井评价,前人已取得一些成果。孙予舒等<sup>[3]</sup>基于XGboost算法建立的岩性识别模型能够有效地识别复杂碳酸盐岩岩性,为复杂碳酸盐岩岩性的测井识别提供了新的思路。Buiting等<sup>[4]</sup>通过应用毛细管压力曲线上某一个固定的进汞饱和度所对应的喉道半径来建立模型,定量表现孔喉结构对储层物性的影响。王俊等<sup>[5]</sup>结合SPSS二阶聚类法将碳酸盐岩储层划分为3种类型,对碳酸盐岩储层分类方法具有一定参考价值。

本文基于前人的研究成果,以哈萨克斯坦北特鲁瓦油田石炭系复杂碳酸盐岩油藏为例,根据不同矿物测井响应值的差异,利用最优化方法反算储层

岩性剖面。基于有限的取心和电成像测井资料,总结出不同储集空间的储层测井响应特征,以此识别储层的储集空间类型。按孔隙储集空间组合与孔渗关系对储层进行分类,建立一套储层类型定量划分标准。通过储层特征分析、岩性与孔隙类型测井识别、储层类型划分和储层参数计算等4个方面的深入研究,形成一套复杂碳酸盐岩储层测井评价方法,对该类油田的高效开发具有较好的指导意义。

## 1 区域地质概况

哈萨克斯坦北特鲁瓦油田位于滨里海盆地东缘,属于大型带凝析气顶的弱挥发复杂碳酸盐岩油藏<sup>[6]</sup>。构造上,该油田位于滨里海盆地东缘的延别克—扎尔卡梅斯古隆起东斜坡的中央区块,整体为北东—南西走向的断背斜构造<sup>[7]</sup>。在油田范围内,钻井揭示的地层为第四系到泥盆系,其中,下二叠统空谷阶发育盐丘构造,以盐岩沉积为界,主要含油层系位于盐下石炭系的中上石炭统,包括KT-I和KT-II两套油层组以及厚约350 m的陆源碎屑岩隔层。

收稿日期:2021-09-27; 改回日期:2022-02-08

本文受中国石油国际勘探开发有限公司海外技术支持研究项目“中亚俄罗斯地区碳酸盐岩油气藏提高采收率研究与应用”(项目编号:E&D-2021-ZC-09)资助

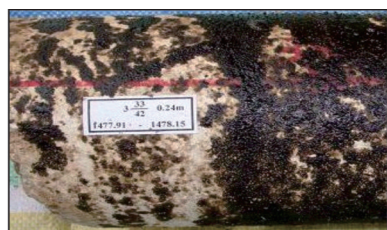
**第一作者:**侯珏,工程师,主要从事石油地质综合研究。通信地址:100083北京市海淀区学院路20号;E-mail:houljue95@petrochina.com.cn

## 2 储层基本特征

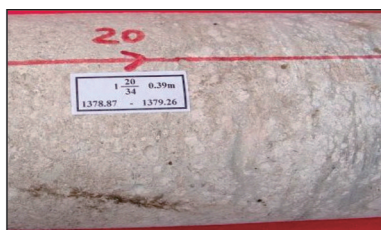
### 2.1 储层岩性特征

北特鲁瓦油田的岩性种类繁多。结合研究区19口取心井、共计971 m的岩心资料以及1 360件岩石薄片鉴定资料,按照邓哈姆、福克等<sup>[8]</sup>的命名分类方案,并考虑到资料的实用精度及实用性,对岩性进行了适当的简化,将岩性划分为石灰岩、白云岩、膏岩、其他岩类(包括泥岩、硅质灰岩、混积岩)4个

大类,具体的主要包括颗粒灰岩(图1a)、泥粒灰岩(图1b)、粒泥灰岩(图1c)、颗粒白云岩(图1d)、泥岩(图1e)、硅质灰岩(图1f)、膏岩。KT-I油层组的岩性主要为颗粒灰岩、晶粒白云岩、膏岩、泥岩,KT-II油层组的岩性主要为颗粒灰岩、泥粒灰岩、粒泥灰岩、硅质灰岩、泥岩,其中石灰岩类含量占90%以上。石灰岩类矿物成分以方解石为主,白云岩的矿物成分以白云石为主,泥岩的矿物成分包括高岭石、萤石、微量黄铁矿及少量其他黏土矿物<sup>[9]</sup>。



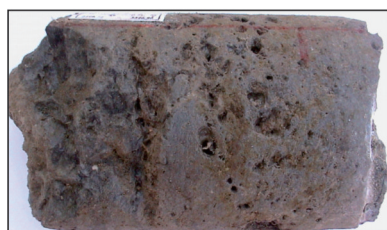
(a) 颗粒灰岩。见油渍,颗粒淘洗洁净,水动力强,孔隙少量发育但类型多,见1条裂缝。CT-52井,KT-I油层组



(b) 泥粒灰岩。多见油浸,轻度白云石化,孔隙多但类型少,见1条高角度裂缝。CT-52井,KT-I油层组



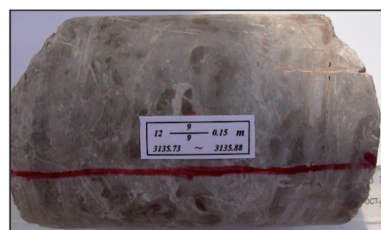
(c) 粒泥灰岩。生物碎屑分布不均匀,未见孔隙,见1条构造裂缝,缝宽>5 mm,未充填。CT-22井,KT-I油层组



(d) 颗粒白云岩。溶孔发育,孔径大,溶沟、溶缝多,连通性好。溶洞半充填石膏和粉砂。CT-4井,KT-II油层组



(e) 灰黑色泥岩。具不规则纹层状构造,固结程度弱,局部失去可塑性,未见孔隙。CT-4井,KT-II油层组



(f) 硅质灰岩。玉髓化强烈,轻度白云石化,未见溶孔,孔隙分布极少,见6条网状缝。CT-4井,KT-II油层组

图1 北特鲁瓦油田主要岩性的岩心照片

Fig. 1 Core photos of main lithology of North Truwa Oilfield

### 2.2 储层物性特征

对工区560个孔渗样品(KT-I油层组192块,KT-II油层组368块)进行统计(图2),孔隙度分布范围为1.0%~40%,渗透率分布范围为 $(0.01 \sim 2\,224) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度和渗透率的分布区间均较大。KT-I油层组发育白云岩储层,受强溶蚀作用的影响,白云岩储层物性得到明显改善<sup>[10]</sup>,其孔隙度分布曲线呈多峰特征,孔隙度平均值为15.5%,渗透率分布范围比KT-II油层组更大,渗透率平均值为 $84.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。KT-II油层组以孔隙型石灰岩储层为主,发育的微裂缝数量明显少于KT-I油层组,孔隙类型多为粒间溶孔和粒内溶孔,其孔隙度分布曲线呈正态分布特征,孔隙度峰值约为13.5%,平均值为

11.8%,渗透率平均值为 $33.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体上,KT-I油层组的物性优于KT-II油层组。

### 2.3 储集空间特征

由岩心观察和薄片鉴定及扫描电镜等资料可知,北特鲁瓦油田石炭系碳酸盐岩储层孔隙发育<sup>[11]</sup>,并有溶洞和裂缝出现(图3),可将其储集空间类型归纳为原生孔隙、次生孔隙和裂缝3大类。原生孔隙指沉积时同生或准同生期形成的孔隙,主要受碳酸盐岩组分所控制<sup>[12]</sup>,以粒间溶孔和体腔孔为主(图3a,3b);次生孔隙主要指由溶蚀作用形成的孔隙,常见的有晶间溶孔、壳溶孔、晶模孔、溶洞(直径大于2 mm的溶孔)(图3c);裂缝主要有方解石强烈充填的构造缝、方解石弱充填的溶蚀缝(图3d)以



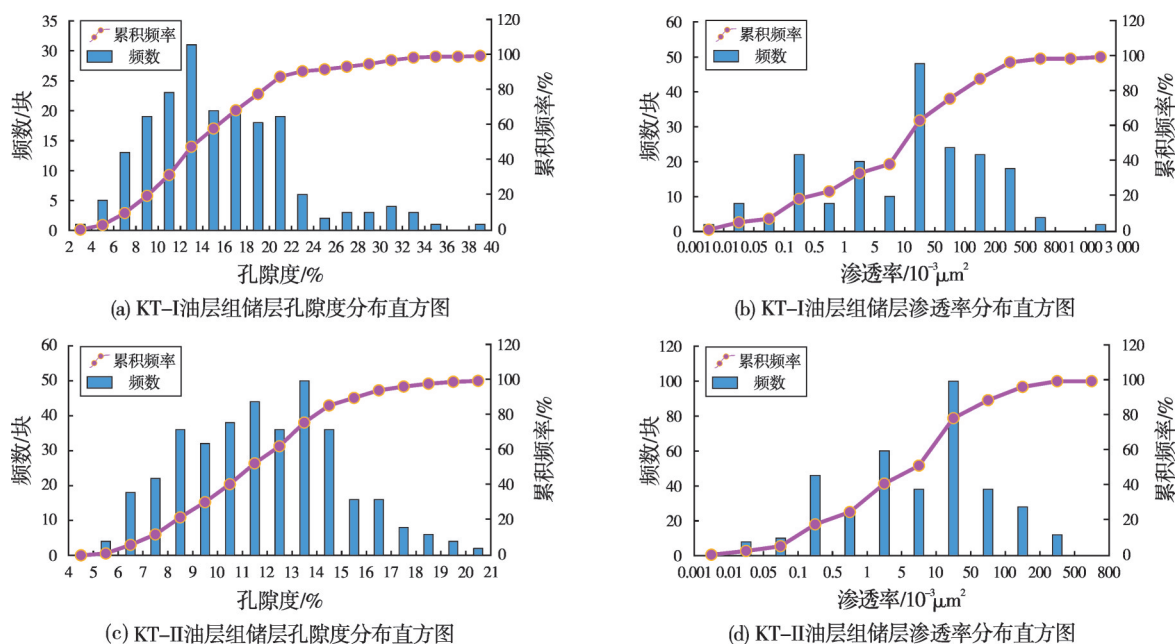


图2 北特鲁瓦油田储层岩心孔隙度、渗透率分布直方图

Fig. 2 Distribution histograms of porosity and permeability of core in North Truwa Oilfield

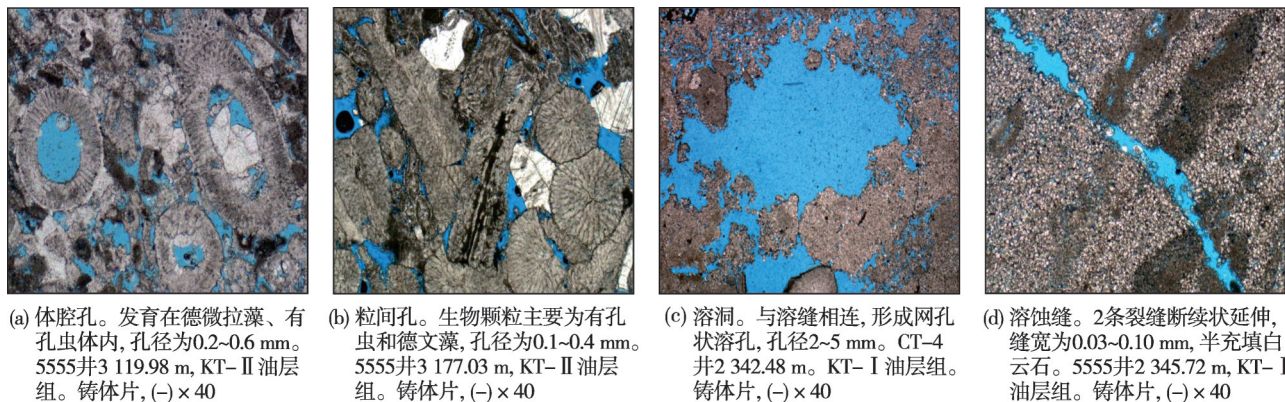


图3 北特鲁瓦油田不同储集空间类型岩心薄片显微照片

Fig. 3 Micrographs of core slices of different types of reservoir space in North Truwa Oilfield

及压溶缝和成岩缝。KT-I油层组发育孔、洞和裂缝, 储集空间类型以晶间溶孔为主, 其次为粒间溶孔和体腔孔。KT-II油层组主要发育孔隙, 裂缝较少, 偶见溶洞, 孔隙类型以粒间溶孔、体腔孔、粒内孔为主, 常见晶间溶孔、晶模孔、晶间微孔。

## 2.4 储层分类

根据岩心观察、薄片鉴定及扫描电镜确定的储集空间类型, 结合1 158块柱塞岩心实验样品共计935个数据点的孔隙度与渗透率数据之间的关系(图4), 将储层类型细分为5类: 孔洞缝复合型、

裂缝孔隙型、孔隙型、孔洞型、裂缝型。孔洞缝复合型储层的溶孔、溶洞、微裂缝发育, 主要为KT-I油层组的白云岩储层, 是物性最好的储层; 裂缝孔隙型储层的孔隙及微裂缝发育, 在KT-I油层组和KT-II油层组均有分布, 是物性较好的储层; 孔隙型储层的溶蚀孔发育, 裂缝不发育, 主要为KT-II油层组的石灰岩储层; 孔洞型储层不多见, 其孔隙及溶洞发育, 但是裂缝不发育, 主要分布在KT-I油层组; 裂缝型储层的孔隙不发育, 裂缝以低角度裂缝及缝合线为主, 一般较致密, 在KT-I油层组和KT-II油层组均有分布。

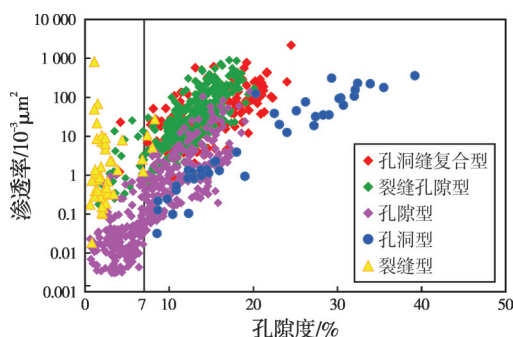


图4 北特鲁瓦油田不同储层类型划分

Fig. 4 Classification of different reservoir types in North Truwa Oilfield

### 3 复杂碳酸盐岩储层测井评价

测井评价的主要目的是解决基质孔隙、溶蚀作用及裂缝发育程度这3个方面的定性及定量解释<sup>[13]</sup>。在储层分类的基础上,应用基质孔隙、裂缝孔隙、连通孔洞孔隙的三重孔隙介质测井解释方法,建立储层类型定量识别标准(表1),通过测井解释模型计算基质、裂缝孔隙度,根据特殊的测井响应特征识别连通孔洞发育的储层,实现储层类型的定量划分。

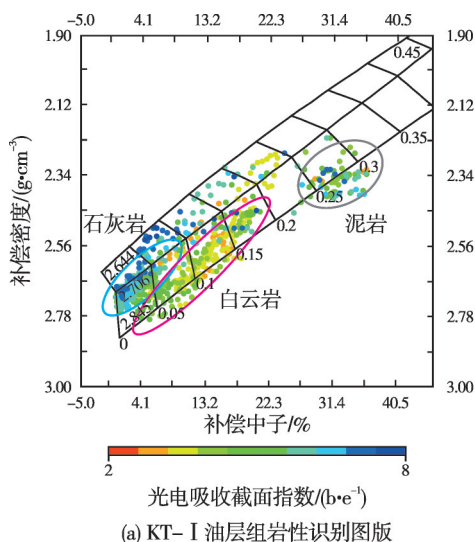
表1 北特鲁瓦油田储层类型定量划分标准

Table 1 Quantitative classification criteria for reservoir types in North Truwa Oilfield

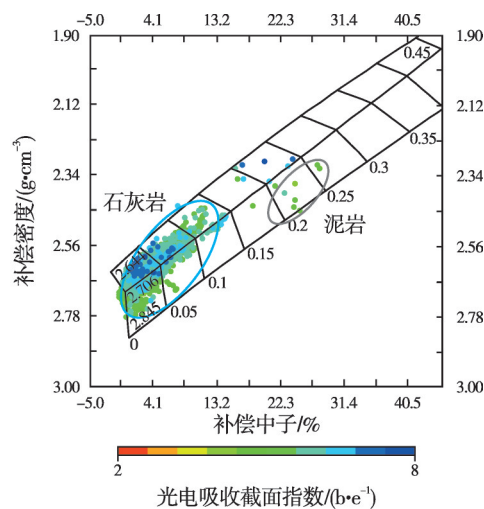
储层类型	基质孔隙度/%	裂缝孔隙度/%	连通孔洞孔隙度/%
孔洞缝复合型	≥7	≥0.12	定性
裂缝孔隙型	≥7	≥0.12	定性
孔洞型	≥7	<0.12	定性
孔隙型	≥7	<0.12	
裂缝型	<7	≥0.12	

### 3.1 岩性识别

KT-I层储层岩性复杂,主要岩性为白云岩和石灰岩。KT-II层储层岩性以石灰岩为主。不同岩性对储层测井响应影响很大,因此,在分析研究区各类岩性测井响应特征的基础上,选择对岩性反映敏感的自然伽马、光电吸收截面指数、电阻率、三孔隙度等常规测井曲线特征值进行判别岩性的试验。通过用岩心资料刻度测井资料发现,中子-密度交会图(图5)对各种岩性都有较好的分辨能力,再结合PE曲线(光电吸收截面指数)可以有效地识别岩性。



(a) KT-I 油层组岩性识别图版



(b) KT-II 油层组岩性识别图版

图5 北特鲁瓦油田岩性识别图版

Fig. 5 Lithology identification charts of North Truwa Oilfield

### 3.2 储集空间类型识别

利用成像测井可以准确识别研究区储层孔隙、裂缝、孔洞等储集空间类型:孔隙在成像测井图上表现为成片暗色模糊图案(6a),一般分布在石灰岩储层段;裂缝在成像测井图像上表现为暗色的大幅度正弦条带(6b),裂缝角度越高,正弦幅

度越大<sup>[14]</sup>;孔洞在成像测井图上表现为暗色团块(6c),一般分布在物性较好的白云岩储层;裂缝孔隙型在成像测井图上表现为暗斑与小幅度暗色正弦条带交互排列(6d);孔洞缝复合型在成像测井图上表现为暗色团块与暗斑组合分布,并伴有成片网状条带(6e)。

如图7所示:孔隙型储层测井响应值表现为两



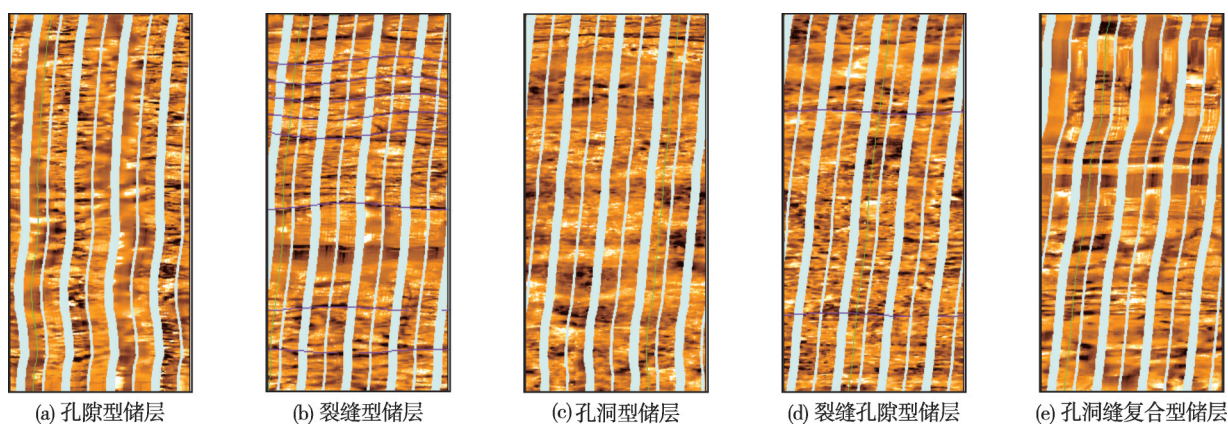


图6 北特鲁瓦油田CT-1井不同储集空间类型成像测井图

Fig. 6 Imaging logging of different reservoir space types of Well CT-1 in North Truwa Oilfield

高两低,即声波时差、中子孔隙度增高,电阻率、岩石体积密度降低;三孔隙度曲线具有较好的相关性,曲线形状圆滑。裂缝型储层微球电阻率曲线在裂缝段比孔隙型储层双侧向有较多的起伏;三孔隙度曲线变化不大,接近骨架测井值(图7a)。孔洞型储层深浅双侧向差异不明显,微球电阻率曲线有起伏,井径稍有扩径现象,三孔隙度曲线变化较大(图7b)。裂缝孔隙型储层测井响应特征与孔隙型储层类似,但电阻率下降得更加明显,且微球电阻率测井曲线呈山峰起伏状(图7c)。孔洞缝复合型储层深浅双侧向曲线具有明显的差异,呈现双轨特征;微球电阻率曲线响应值下降很大;三孔隙度曲线差异大,变化明显(图7d)。

### 3.3 储层参数计算

储层特征主要指储层岩性、物性、电性、含油性及其之间的关系。在充分了解储层“四性”特征的基础上,选择合理的测井解释参数建立测井解释模型,测井解释结果才能符合储层的地质规律。为此,在岩性识别的基础上,利用碳酸盐岩最优化处理方法代替常规的自然伽马测井资料解释岩性,构建准确的地层岩性剖面;结合不同储层类型的测井响应特征,利用双电阻率重叠法计算储层的裂缝孔隙度,作为储层类型定量划分的依据;在岩心孔渗分析的基础上建立不同储层类型的渗透率计算模型,结合斯伦贝谢经验公式计算裂缝渗透率,即可

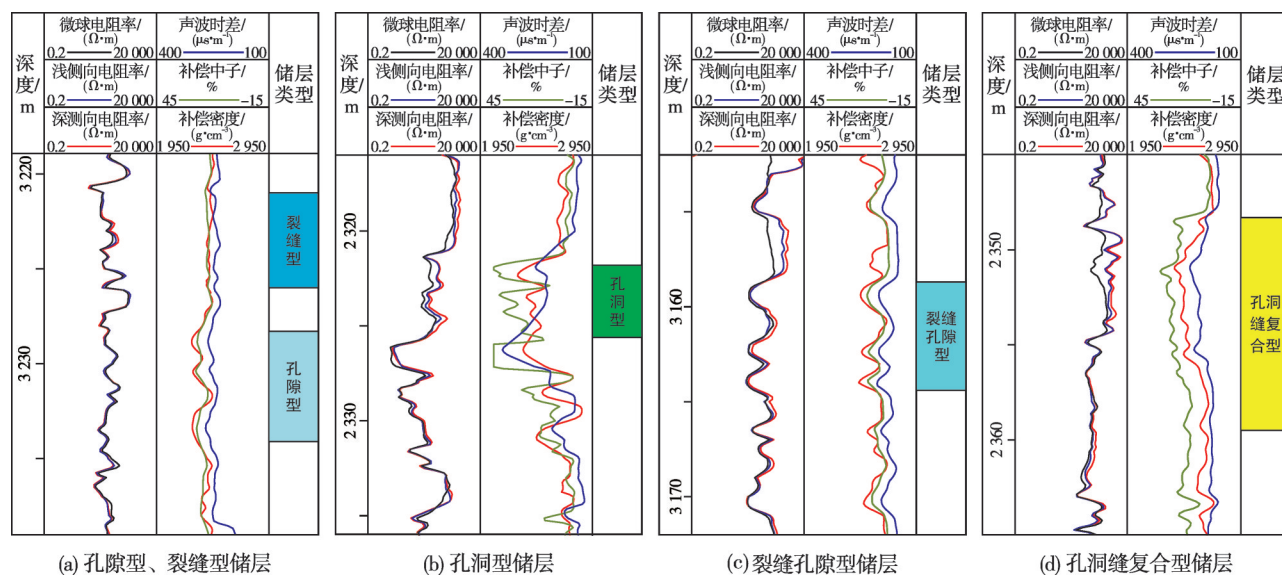


图7 北特鲁瓦油田不同类型储层测井响应

Fig. 7 Logging response of different reservoir types in North Truwa Oilfield

实现基质渗透率、裂缝渗透率的双重表征;利用基质电阻率曲线建立储层双重介质饱和度模型,可实现流体性质的识别,形成一套较好适应研究区地质特征的测井评价方法。

### 3.3.1 多矿物模型处理方法

北特鲁瓦油田储层为多矿物复杂岩性储层,仅用自然伽马测井曲线计算岩性剖面不能满足解释要求。本次采用Ciflog测井解释系统提供的碳酸盐岩最优化处理程序,优选中子、密度、声波、深浅电阻率共计5条曲线,用组合模型计算地层各种矿物的体积含量从而构建地层岩性剖面,真实反映地层岩性的矿物组分,为储层岩相划分提供依据。根据物质守恒原则,把复杂岩性地层看成是由均匀分布的几种主要骨架矿物和充满流体的孔隙所组成的,各成分的体积之和为1,用组合模型计算地层各矿物的含量和孔隙体积:

$$1 = V_1 + V_2 + \dots + V_j + V_\phi \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_i \\ L_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1\phi} \\ P_{21} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2\phi} \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{i\phi} \\ P_{(n-1)1} & \dots & P_{(n-1)j} & \dots & P_{(n-1)\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_j \\ V_\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_i$ 为测井曲线读值,无量纲; $P_{ij}$ 为矿物测井响应参数,无量纲; $V_j$ 为矿物的相对体积含量, $v/v$ 。

### 3.3.2 裂缝参数计算

对于孔隙型储层,储层电阻率与声波时差具有很好的相关性,而由于裂缝的存在,在储层孔隙度变化不大的情况下,大幅度增加了储层的导电性,使裂缝发育的储层在电阻率与声波时差关系中有明显区分。声波时差反映储层基质孔隙度,受储层岩性及流体影响较小,可用于构建储层基质电阻率(图8):

$$\text{白云岩储层: } R_B = 11\,020 \times e^{-0.029 \times DT} \quad (3)$$

$$\text{石灰岩储层: } R_B = 4 \times 10^6 \times e^{-0.062 \times DT} \quad (4)$$

式中: $R_B$ 为基质地层电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $DT$ 为声波时差, $\mu s/m$ 。

根据取心资料,选取一段纯孔隙性基质地层,利用声波时差与深侧向电阻率二者很好的相关性,建立基质地层电阻率曲线 $R_B$ ,再采用双电阻率重叠

法计算裂缝孔隙度:

$$\phi_f = \sqrt{R_{mf} \left( \frac{1}{R_D} - \frac{1}{R_B} \right)} \quad (5)$$

式中: $\phi_f$ 为裂缝孔隙度, $v/v$ ;  $mf$ 为裂缝孔隙度指数, $\Omega \cdot m$ ;  $R_{mf}$ 为泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_D$ 为深探测地层电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_B$ 为基质地层电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

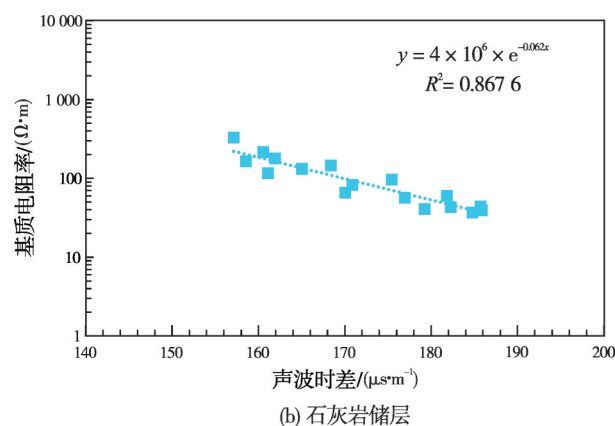
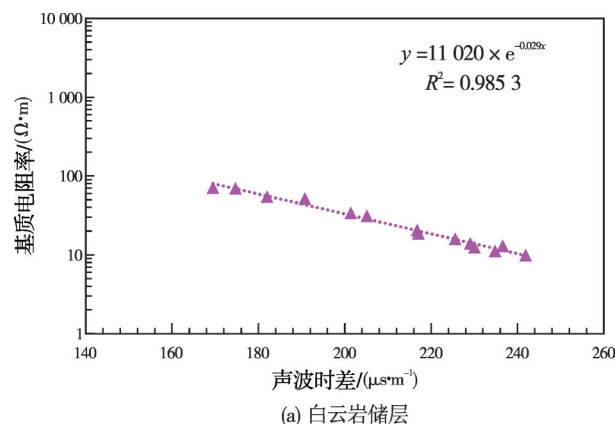


图8 北特鲁瓦油田不同岩性储层基质电阻率计算模型  
Fig. 8 Matrix resistivity calculation models for different lithological reservoirs in North Truwa Oilfield

研究区碳酸盐岩储渗空间由孔隙和裂缝双重介质组成<sup>[15]</sup>,因此,其渗透率是由基质孔隙渗透率 $K_b$ 和裂缝渗透率 $K_f$ 共同组成,且两者的差别很大(裂缝渗透率 $K_f$ 比基质孔隙渗透率 $K_b$ 大得多)。裂缝的发育导致基质孔隙渗透率 $K_b$ 和裂缝渗透率 $K_f$ 对总渗透率的贡献程度不同。研究发现,采用斯伦贝谢裂缝渗透率计算公式效果最好。研究认为,对于储层中发育的裂缝,测井深侧向电阻率大于浅侧向电阻率即为高角度缝,深侧向电阻率小于浅侧向电阻率即为低角度缝。利用裂缝开度与深、浅侧向电阻率差异,计算网状裂缝渗透率:

$$\text{高角度缝: } b = \frac{C_{\text{lls}} - C_{\text{lld}}}{4C_{\text{mf}}} \times 10^4 \quad (6)$$

$$\text{低角度缝: } b = \frac{C_{\text{lls}} - C_{\text{lld}}}{1.2C_{\text{mf}}} \times 10^3 \quad (7)$$

$$K_f = 0.566R \times b^2 \times \phi_f^{mf} \quad (8)$$

式中： $C_{\text{lls}}$ 为浅侧向电导率，S/m； $C_{\text{lld}}$ 为深侧向电导率，S/m； $C_{\text{mf}}$ 为泥浆滤液电导率，S/m； $b$ 为裂缝开度，无量纲； $K_f$ 为裂缝渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ； $R$ 为裂缝径向延伸系数，取值0.4~1.0； $\phi_f$ 为裂缝孔隙度，%； $mf$ 为裂缝孔隙指数，无量纲。

### 3.3.3 渗透率模型

利用全直径碳酸盐岩岩心分析资料，对不同储层类型的孔渗关系进行表征，建立较准确的孔渗关系模型。如图9所示，根据油田3口取心井的全直径岩心分析孔隙度与渗透率交会，确定各类型储层的渗透率模型为：

$$\text{孔隙型储层: } K = 0.0105 \times e^{0.3159 \times \phi} \quad (9)$$

$$\text{裂缝型储层: } K = 0.2543 \times e^{0.5494 \times \phi} \quad (10)$$

$$\text{裂缝孔隙型储层: } K = 0.1954 \times e^{0.3691 \times \phi} \quad (11)$$

$$\text{孔洞缝复合型储层: } K = 1.5465 \times e^{0.2282 \times \phi} \quad (12)$$

式中： $K$ 为渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ； $\phi$ 为有效孔隙度，%。孔洞型储层的孔渗关系为孔隙型储层在一定孔隙区间下的表现形式，因此，孔洞型储层的渗透率可采用孔隙型储层渗透率计算公式。

### 3.3.4 饱和度模型

对于北特鲁瓦油田的孔隙性地层，孔隙型储层可以近似看作均匀、各向同性介质，当储层泥质含量不高或泥质对储层电阻率影响较小时，可直接利用阿尔奇公式计算饱和度；对于裂缝性地层，用建立的基质电阻率曲线 $R_b$ 代替深侧向电阻率曲线 $R_t$ ，可以得到更接近地层真实含水饱和度的值。

$$S_w = \left( \frac{a \times b \times R_w}{R_t \times \phi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

式中： $S_w$ 为含水饱和度值，%； $R_t$ 为深侧向电阻率测井值， $\Omega \cdot \text{m}$ ； $\phi$ 为孔隙度，%； $R_w$ 为地层水电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ 。根据地区岩电分析实验，KT-I油层组采用以下岩电参数： $m=2.03$ ， $a=1$ ， $n=1.81$ ， $b=1$ ， $R_w=0.054 \Omega \cdot \text{m}$ （25℃）；KT-II油层组采用以下岩电参数： $m=2.03$ ， $a=1$ ， $n=1.67$ ， $b=1$ ， $R_w=0.047 \Omega \cdot \text{m}$ （25℃）。

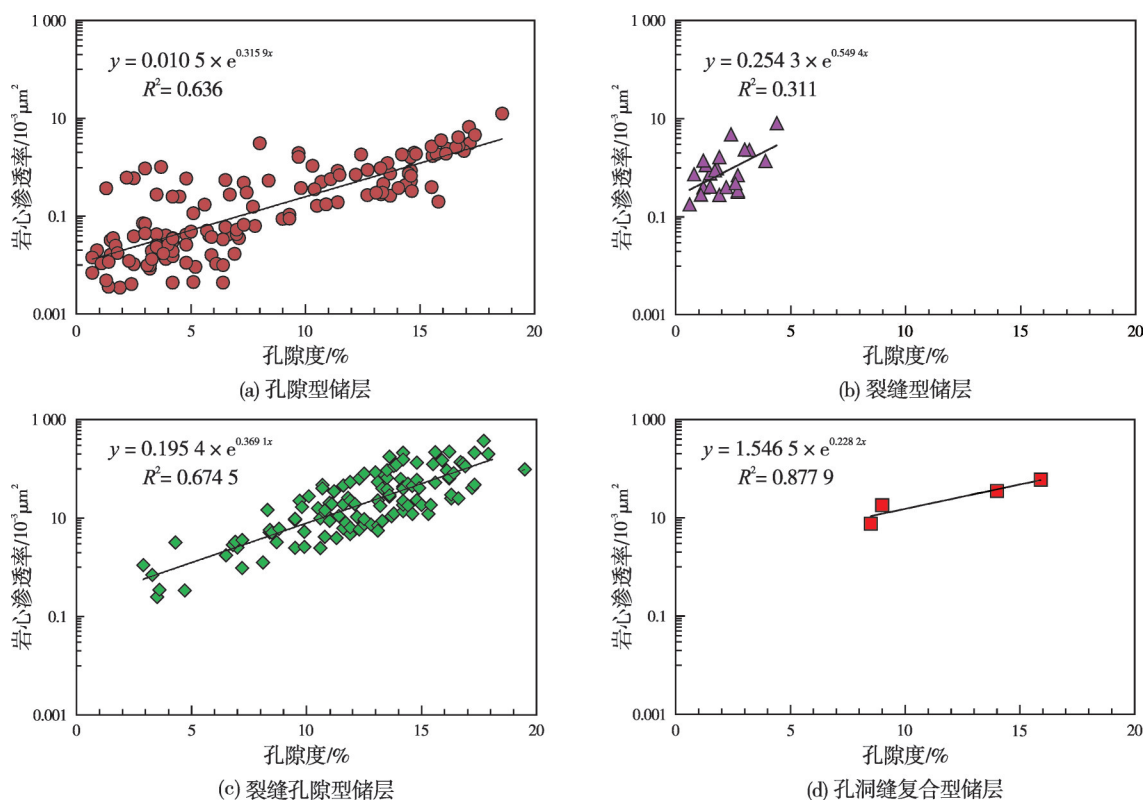


图9 北特鲁瓦油田不同类型储层渗透率计算模型

Fig. 9 Permeability calculation models for different reservoir types in North Truwa Oilfield



#### 4 测井综合评价应用实例

以研究区 CT-4 井为例,该井在 KT-I 油层组的 2 322~2 354 m 井段取心,并进行岩心孔渗分析实验。测井解释结果表明(图 10):取心段为夹杂泥质的复杂岩性储层,矿物成分以方解石、白云石和黏土矿物为主;有效孔隙度在 0%~20% 之间,渗透率介于  $(0\sim 260)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;主要储层类型为孔洞缝复合型储层。整体上,KT-I 油层组以白云岩油层为主,见黄绿色轻质油和天然气产出,KT-I 油层组下部致密的石灰岩层无油气显示。储层定性与定量评价结果与

研究区地质和生产动态资料的符合性好。在 2 321~2 325 m、2 337~2 354 m 储层类型解释为孔洞型和孔洞缝复合型的储层段,钻井岩心照片上可见到明显的溶洞分布;在 2 327~2 328 m 储层类型解释为裂缝孔隙型储层的取心照片上,虽然无法通过肉眼见到微裂缝的发育,但根据解释出的裂缝孔隙度及储层类型划分标准,仍将其定义为裂缝孔隙型储层。并且,评价结果在测井解释渗透率与岩心分析渗透率的匹配程度上得到了很好的验证。整体上,测井解释孔隙度与岩心分析孔隙度误差一般在 1%~3%,说明研究区的储层综合评价结果较为准确。

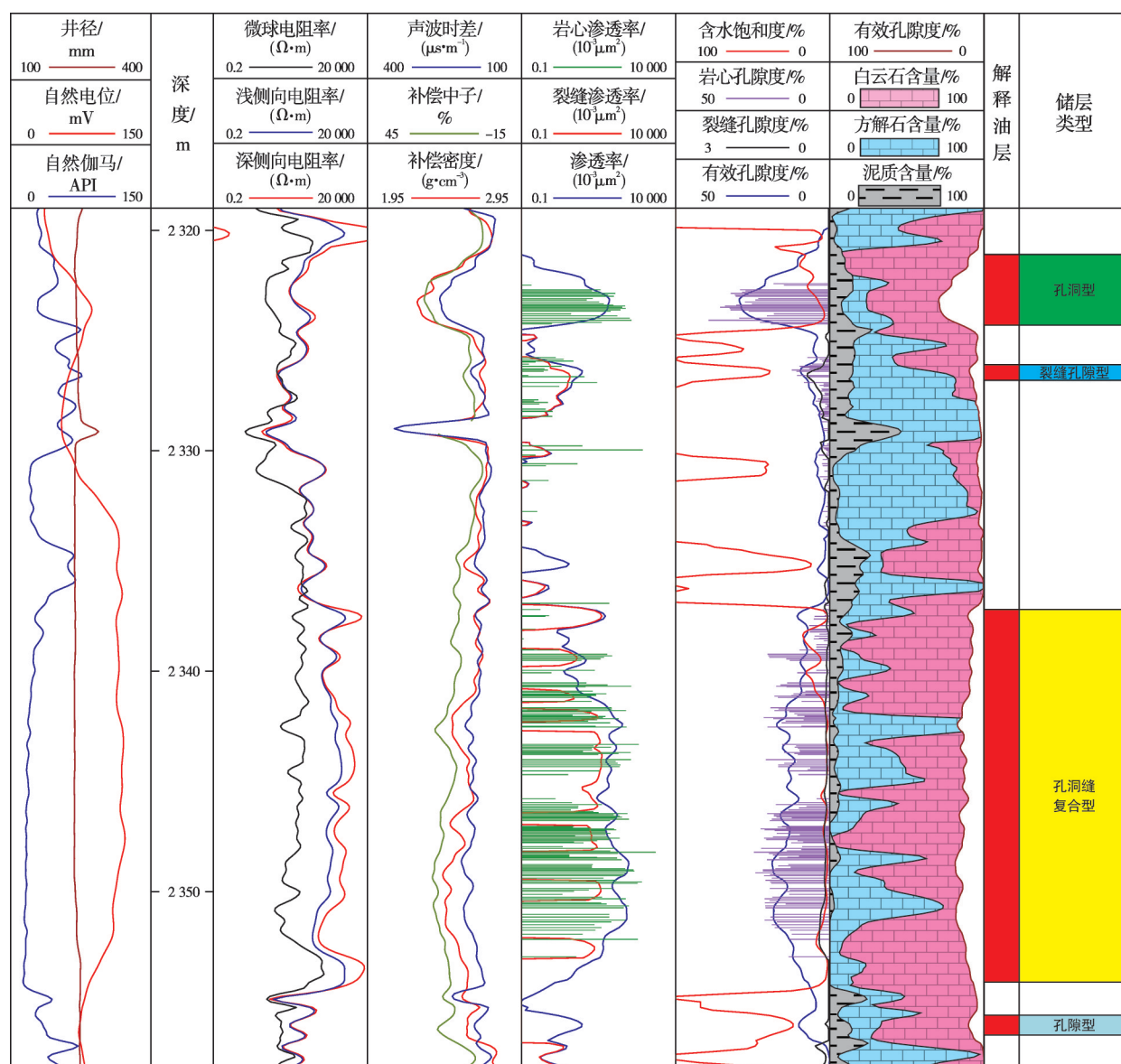


图 10 北特鲁瓦油田 CT-4 井 KT-I 油层组测井综合解释

Fig. 10 Comprehensive logging interpretation column of KT-I reservoir group of Well CT-4 in North Truwa Oilfield



## 5 结 论

(1) 哈萨克斯坦北特鲁瓦油田中上石炭统 KT-I 油层组碳酸盐岩储层岩性以颗粒灰岩和晶粒白云岩为主, KT-II 油层组储层岩性以颗粒灰岩为主。KT-I 油层组孔隙度平均值为 15.5%, 渗透率平均值为  $84.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; KT-II 油层组孔隙度平均值为 11.8%, 渗透率平均值为  $33.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。KT-I 油层组的物性优于 KT-II 油层组。

(2) 北特鲁瓦油田储层发育孔、洞、缝多种储集空间且组合方式多样, 储层孔渗关系复杂。根据岩心样品观察结果及孔渗关系, 建立裂缝孔隙双重孔隙度测井解释方法, 定性、定量地将储层划分为 5 类: 孔洞缝复合型、裂缝孔隙型、孔隙型、孔洞型、裂缝型。

(3) 通过碳酸盐岩最优化解释方法构建储层岩性剖面, 利用经验公式计算储层裂缝孔隙度、裂缝渗透率, 根据岩心孔渗分析资料得到不同储层类型的渗透率模型, 间接反映出储层基质渗透率, 在基质电阻率曲线基础上, 建立储层双重介质饱和度模型, 实现储层流体性质的识别。确立了一套适合北特鲁瓦油田复杂碳酸盐岩储层的测井评价方法, 也对类似地质条件的复杂碳酸盐岩储层测井评价提供借鉴。

### 参 考 文 献

- [1] BAGRINTSEVA K I. Carbonate reservoir rocks[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [2] 李伟强, 穆龙新, 赵伦, 等. 滨里海盆地东缘石炭系碳酸盐岩储集层孔喉结构特征及对孔渗关系的影响[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 958-971.  
LI Weiqiang, MU Longxin, ZHAO Lun, et al. Pore-throat structure characteristics and their impact on the porosity and permeability relationship of Carboniferous carbonate reservoirs in eastern edge of Pre-Caspian Basin [J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(5): 958-971.
- [3] 孙予舒, 黄芸, 梁婷, 等. 基于 XGBoost 算法的复杂碳酸盐岩岩性测井识别[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(4): 98-106.  
SUN Yushu, HUANG Yun, LIANG Ting, et al. Identification of complex carbonate lithology by logging based on XGBoost algorithm[J]. Lithologic reservoirs, 2020, 32(4): 98-106.
- [4] BUITING J J M, CLERKE E A. Permeability from porosimetry measurements: derivation for a tortuous and fractal tubular bundle [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2013, 108(4): 267-278.
- [5] 王俊, 张超漠. 中东地区碳酸盐岩储层孔隙结构与分类评价[J]. 测井技术, 2019, 43(6): 630-635.  
WANG Jun, ZHANG Chaomo. Pore structures and classifica-
- tion of carbonate reservoirs in the Middle East [J]. Well logging technology, 2019, 43(6): 630-635.
- [6] 何伶, 赵伦, 李建新, 等. 碳酸盐岩储集层复杂孔渗关系及影响因素: 以滨里海盆地台地相为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 206-214.  
HE Ling, ZHAO Lun, LI Jianxin, et al. Complex relationship between porosity and permeability of carbonate reservoirs and its controlling factors: a case of platform facies in Pre-Caspian Basin [J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(2): 206-214.
- [7] 郑俊章, 周海燕, 黄先雄, 等. 哈萨克斯坦地区石油地质基本特征及勘探潜力分析[J]. 中国石油勘探, 2009, 80(2): 80-86.  
ZHENG Junzhang, ZHOU Haiyan, HUANG Xianxiong, et al. Basic characteristics of petroleum geology and exploration potential analysis in Kazakhstan [J]. China petroleum exploration, 2009, 80(2): 80-86.
- [8] 孙福亭, 汪洪强, 王龙, 等. 基于岩石物理相的白云岩储层分类评价: 以中东 A 油田 Asmari 组 A 段为例[J]. 石油化工应用, 2020, 39(10): 84-89.  
SUN Futing, WANG Hongqiang, WANG Long, et al. Reservoir classification and evaluation of dolomite reservoir based on petrophysical facies: a case study on Asmari Formation of A Oilfield, the Middle East [J]. Petrochemical industry application, 2020, 39(10): 84-89.
- [9] 梁爽, 吴亚东, 王燕琨, 等. 滨里海盆地东缘盐下油气成藏特征与主控因素[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 125-132.  
LIANG Shuang, WU Yadong, WANG Yankun, et al. Characteristics and main controlling factors of sub-salt oil and gas accumulation in the eastern margin of the Precaspian Basin [J]. China petroleum exploration, 2020, 25(4): 125-132.
- [10] ESRAFILI-DIZAJI B, RAHIMPOUR-BONAB H. Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf [J]. Petroleum geoscience, 2009, 15(4): 325-344.
- [11] 卢志明, 张大伟, 徐士鹏, 等. 孔隙型碳酸盐岩储层分类与质量评价: 以哈萨克斯坦北特鲁瓦油田 KT-I 油层组为例[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(2): 12-17.  
LU Zhiming, ZHANG Dawei, XU Shipeng, et al. Classification and quality evaluation of porous carbonate reservoir: in Kazakhstan KT-I oil reservoir group as an example of North Tluwa Oilfield [J]. Xinjiang oil & gas, 2019, 15(2): 12-17.
- [12] 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 23-30.  
FAN Jiasong. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential factors for their formation [J]. Earth science frontiers, 2005, 12(3): 23-30.
- [13] THOMEER J H. Air permeability as a function of three pore-network parameters [J]. Journal of petroleum technology, 1983, 35(4): 809-814.
- [14] 袁龙, 张凤生, 吴思仪, 等. 中东地区高孔隙度低渗透率碳酸盐岩储层测井评价技术[J]. 测井技术, 2016, 40(5): 564-571.

YUAN Long, ZHANG Fengsheng, WU Siyi, et al. Log evaluation technology for high porosity and low permeability carbonate reservoirs in the Middle East [J]. Well logging technology, 2016, 40(5): 564–571.

[15] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出

版社, 2008:175–176.

HONG Youmi. Logging principles and comprehensive interpretation [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008:175–176.

编辑: 黄革萍

## Logging evaluation of Carboniferous carbonate reservoir in North Truwa Oilfield, Kazakhstan

HOU Jue, LIN Yaping, ZHAO Wenqi, LUO Man, LI Jianxin, WANG Shuqin

**Abstract:** Carbonate reservoirs play an extremely important role in oil and gas production in the world, and they contribute about 60% of the world's oil and gas production. As the development of widespread continental clastic reservoirs in China comes to the late stage, the Chinese petroleum companies pay more attention to overseas marine carbonate reservoirs. Compared with clastic reservoirs, carbonate reservoirs are always in the spotlight because of their complexity and strong heterogeneity. Influenced by sedimentation, tectonism and differential diagenesis, there are many difficulties of the Carboniferous carbonate reservoirs in North Truwa Oilfield, Kazakhstan in lithology identification, reservoir parameter calculation and fluid property identification due to complex lithology, diverse pore structure, poor matrix physical properties and complex logging response. In view of the problems existing in the logging evaluation of complex carbonate reservoirs in this oilfield, based on a large number of core observation and thin section analysis, the mineral components of this kind of reservoirs are reliably identified through the carbonate optimization processing method, and then the lithologic profile is calculated. Combined with imaging logging data, the dual medium interpretation model of pore and fracture is established to realize the quantitative characterization of complex carbonate reservoir, effectively depict the spatial type and connectivity of reservoir, and identify and classify various pore types. According to the combination characteristics of reservoir space and the relationship between porosity and permeability, the reservoir is divided into five types: hole–fracture, fracture–pore, pore, hole and fracture. The logging evaluation on the reservoir classification improves the interpretation accuracy of reservoir physical property, which provide reference for reservoir productivity prediction, qualitative and quantitative reservoir evaluation method and the theory research. A set of relatively perfect logging evaluation method for complex carbonate reservoir is obtained, which has guiding significance for logging evaluation of similar reservoir in littoral Caspian Basin and other areas.

**Key words:** carbonate reservoir; logging evaluation; porosity–permeability relationship; reservoir space combination; pore structure; Carboniferous; North Truwa Oilfield

**HOU Jue**, First author: Engineer, mainly engaged in comprehensive research of petroleum geology. Add: Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China