

基于测井曲线无量纲交会法的致密砂岩储层 “甜点”识别及预测

郭春安^{1,2} 关平^{1,2} 师永民^{1,2,†} 杜书恒³

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190; † 通信作者, E-mail: sym@vip.163.com

摘要 基于自然伽马和声波时差曲线对致密砂岩储层具有良好测井响应的原理, 采用经验试错法、基于储层非均质性的归一化法和声波孔隙度法3种方式, 将鄂尔多斯盆地某油田区块的自然伽马和声波时差曲线变换成新曲线, 提出测井曲线无量纲交会法, 构建得到非均质性评价指标(HEI)和孔-渗综合评价指标(PPI)两个“甜点”指数, 对致密砂岩储层进行定量评价。探索综合运用无量纲交会法和“甜点”指数判别法来识别致密砂岩储层“甜点”的新方法, 对研究区储层进行分类评价及“甜点”预测。研究结果与矿场实测数据吻合度较高, 可为致密砂岩储层“甜点”预测提供较重要的理论和实践依据。

关键词 鄂尔多斯盆地; 致密砂岩储层; 无量纲交会法; “甜点”预测; 储层分类评价

Identification and Prediction of “Sweet Spots” in Tight Sandstone Reservoirs Based on Logging Curve Dimensionless Rendezvous Method

GUO Chun'an^{1,2}, GUAN Ping^{1,2}, SHI Yongmin^{1,2,†}, DU Shuheng³

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; 3. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; † Corresponding author, E-mail: sym@vip.163.com

Abstract Based on the principle that natural gamma and acoustic time difference curves have nice logging response in tight sandstone reservoirs, three methods named experience trial and error, the degeneralization method based on the non-homogeneous nature of the reservoir and sonic porosity method were adopted to transform the natural gamma and acoustic time difference curves in an oilfield area of Ordos Basin into new curves to propose a logging curve dimensionless rendezvous method, and two kinds of “sweet spots” indexes named heterogeneity evaluation index (HEI) and porosity-permeability comprehensive evaluation index (PPI) were constructed to evaluate the tight sandstone reservoirs quantitatively. A new means was explored to identify the “sweet spots” of tight sandstone reservoirs by using dimensionless rendezvous method and “sweet spots” indexes to carry out reservoir classification, evaluation and “sweet spots” prediction in the study area. The conclusions of this research are in good agreement with the measured data in the mine, which will provide an important theoretical and practical basis for the prediction of “sweet spots” in the tight sandstone reservoirs.

Key words Ordos Basin; tight sandstone reservoirs; dimensionless rendezvous method; “sweet spots” prediction; reservoir classification and evaluation

近年来, 在非常规油气勘探开发领域, 评价致密砂岩储层的储集性能并预测“甜点”空间分布成为重点和难点^[1-6]。有关致密砂岩储层的划分与评价,

目前国际上尚未形成统一的标准^[7-9]。一些学者通过核磁共振、扫描电子显微镜和压汞实验来测定和表征储层物性的各项参数, 结合储层的岩性、脆

性、应力各向异性以及烃源岩潜力和性质,或结合吸水实验、沉积相和测井特征等,定性地制定致密储层的划分方案^[10-18],此类做法具有较强主观性,时间和经济成本也较大。还有一些学者在定性研究的基础上,利用层次分析法、主成分分析法、灰色关联分析法、模糊综合评价法、神经网络算法、Q型聚类分析法以及优化岩石物理模型等数理分析方法,建立储层综合评价指数来评价致密砂岩储层^[19-31],此类方法具有定量性的特征,但所需资料较多,在油田生产实践中不具有普适性。

作为我国致密油勘探开发的主要目标之一的鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组,发育一套自湖进相至湖退相的薄层砂泥岩互层沉积体系,其中长7油层组以致密砂岩非常规储层为主^[32-36]。面对全球油价持续走低的市场背景,经济而高效地评价储层的相对优劣并进行“甜点”预测成为业内普遍关注的焦点^[37-39]。本文以测井理论为基础,采用经验试错法、基于储层非均质性的归一化法和声波孔隙度法3种无量纲途径,对鄂尔多斯盆地某油田区块较易获得的自然伽马和声波时差曲线进行改造交会,通过改造路径和灰色关联分析法,得到致密砂岩储层定量评价的“甜点”指数,从而能够综合评判致密砂岩储层的储集性能,并通过将实例应用结果与前人相关研究资料进行比较,证明本文方法的实用性。

1 声波-伽马无量纲交会法

1.1 无量纲交会法的原理

无量纲交会法评价致密砂岩储层的一般程序如下:将自然伽马(GR)曲线和声波时差(DT)原始曲线放在同一曲线道上进行交会,调节两者的位置,使之居于曲线道的中间。当自然伽马曲线在声波时差曲线左边时,两者之间幅度差越大,则该层段砂岩

储层的储集性能越好。据此,在曲线图上直观地判断储层的优劣,并将研究区致密砂岩储层大致划分为4类(图1)。

在实际操作中,不同人员或同一人员在不同时刻调节的自然伽马和声波时差测井曲线模板往往存在差异,这种偶然性因素是无法消除的,因此亟需寻找一个适应于研究区的“公式”去定量地表征这种现象。事实上,我们至少面临以下两个问题:1)自然伽马的单位为API,声波时差的单位为 $\mu\text{s}/\text{m}$,两者量纲不同,无法比较;2)通常情况下,自然伽马测井数值远小于声波时差测井数值,两者数量级别不同,不能直接比较。

为了解决上述问题,本文以研究区为例,提出利用经验试错法、基于储层非均质性的归一化法和声波孔隙度法3种方式来实现无量纲交会法。

1.2 无量纲交会法的实现

1.2.1 经验试错法

依据测井解释经验及研究区实际情况,通过数据统计及大量尝试,寻找到适应于研究区的公式,将原有自然伽马曲线和声波时差曲线变换成新曲线进行比较,即

$$\begin{cases} \text{GR}_1 = (\text{GR} - 56)/99, \\ \text{DT}_1 = (\text{DT} - 174)/226, \end{cases} \quad (1)$$

式中, GR_1 为新的自然伽马测井值(无量纲), DT_1 为新的声波时差测井值(无量纲),GR为原始自然伽马测井值(API),DT为原始声波时差测井值($\mu\text{s}/\text{m}$)。

1.2.2 基于储层非均质性的归一化法

应用油藏评价软件Discovery,对长7油层组进行精细描述,根据实际需要划分到油层、砂岩组、小层和单砂体,对每个最小地质分层单位上的自然伽马曲线和声波时差曲线进行相应的无量纲操作:

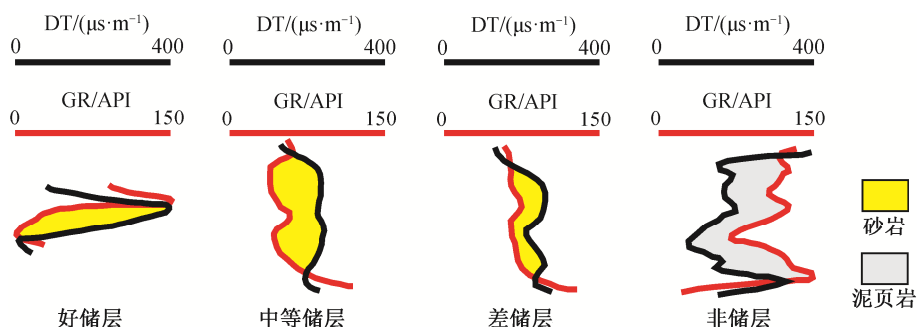


图1 无量纲交会法评价致密砂岩储层图示

Fig. 1 Evaluation figure of tight sandstone reservoirs by dimensionless rendezvous method

$$\begin{cases} GR_2 = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}, \\ DT_2 = \frac{DT - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}}, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, GR_2 为经过无量纲化的原始自然伽马曲线值, DT_2 为经过无量纲化的原始声波时差曲线值, GR_{\max} 为原始自然伽马曲线在各最小地质分层单元区间的最大值(API), GR_{\min} 为原始自然伽马曲线在各最小地质分层单元区间的最小值(API), DT_{\max} 为原始声波时差曲线在各最小地质分层单元区间的最大值($\mu\text{s/m}$), DT_{\min} 为原始声波时差曲线在各最小地质分层单元区间的最小值($\mu\text{s/m}$)。

1.2.3 声波孔隙度法

在利用测井或地震资料计算砂岩孔隙度方面, Wyllie 等^[40]假设的岩石物理模型仅由充满流体的孔隙和均匀固结的纯砂岩组成, Angeleri 等^[41]则认为孔隙、砂岩骨架和泥质构成的三元结构模型较为合适。本研究基于 Angeleri 模型^[41], 运用潘和平等^[42]归纳的孔隙度确定方法, 将研究区长 7 油层组简化为孔隙、泥质和砂岩骨架 3 个部分, 利用微积分方法进一步说明对其孔隙度的求解。

用一组曲线网将长 7 油层组分成 m 个小长柱体, 任意选择其中一个长柱体, 其高度为长 7 油层组的厚度, 记为 L , 横截面积很小(无限趋于 0), 记为 dS , 长柱体与长 7 和长 8 地层面相交的两个封闭区域可近似为平面(图 2), 则长 7 油层组的体积 C 可表示为

$$C = \int L dS. \quad (3)$$

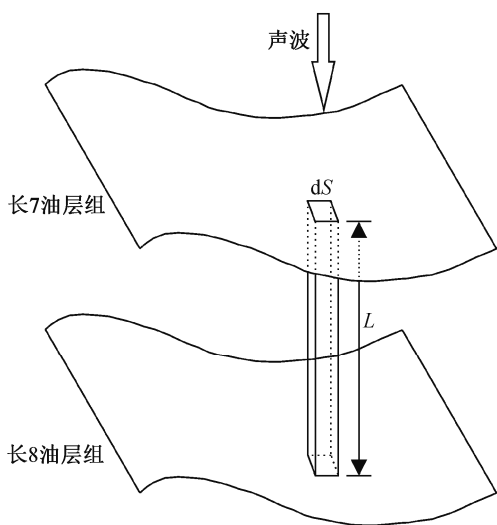


图 2 研究区长 7 油层组简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of Chang-7 oil layers in the study area

声波通过该长柱体的总时间 T 等于通过其内部孔隙的时间 T_{POR} 、通过泥岩介质的时间 T_{SH} 和通过砂岩骨架的时间 T_{MA} 之和, 即

$$\frac{L}{V} = \frac{L_{\text{POR}}}{V_{\text{POR}}} + \frac{L_{\text{SH}}}{V_{\text{SH}}} + \frac{L_{\text{MA}}}{V_{\text{MA}}}, \quad (4)$$

式中, V 为声波通过介质的平均速度(m/s), 下角标 POR, SH 和 MA 分别代表孔隙、泥质和砂岩骨架。

等式两边同时积分, 得到

$$\frac{\int L dS}{V} = \frac{\int L_{\text{POR}} dS}{V_{\text{POR}}} + \frac{\int L_{\text{SH}} dS}{V_{\text{SH}}} + \frac{\int L_{\text{MA}} dS}{V_{\text{MA}}}, \quad (5)$$

即

$$\frac{C}{V} = \frac{C_{\text{POR}}}{V_{\text{POR}}} + \frac{C_{\text{SH}}}{V_{\text{SH}}} + \frac{C_{\text{MA}}}{V_{\text{MA}}}. \quad (6)$$

经推导, 得到研究区任意位置孔隙度的计算公式为

$$\varphi = \frac{DT - DT_{\text{MA}}}{DT_{\text{POR}} - DT_{\text{MA}}} - U_{\text{SH}} \frac{DT_{\text{SH}} - DT_{\text{MA}}}{DT_{\text{POR}} - DT_{\text{MA}}}, \quad (7)$$

式中, φ 为孔隙度(%), U_{SH} 为泥质含量(%).

在模型化的长 7 油层组 3 个部分中, 声波在孔隙中传播的速度最小, 故声波时差最大, 即 DT_{POR} 可用 DT_{\max} 表示。同理, DT_{MA} 可用 DT_{\min} 表示, 则式(7)可进一步演变为

$$\varphi = \frac{DT - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}} - U_{\text{SH}} \frac{DT_{\text{SH}} - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}}, \quad (8)$$

在求解孔隙度时, 需要先求总孔隙度, 再进行压实校正和泥质校正, 因此最终求取孔隙度的公式为

$$\varphi = \frac{DT - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}} \frac{1}{C_p} - U_{\text{SH}} \frac{DT_{\text{SH}} - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}}, \quad (9)$$

式中, C_p 为压实校正系数(无量纲)。

对比研究区 47 个取芯井样品孔隙度的实验室测定值与式(9)的计算值(图 3), 可以说明该孔隙度计算公式在研究区的适用性较强。式(9)的第一项是对 DT 的改造, 第二项则是对 GR 的改造, 即

$$\begin{cases} DT_3 = \frac{DT - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}} \frac{1}{C_p}, \\ GR_3 = U_{\text{SH}} \frac{DT_{\text{SH}} - DT_{\min}}{DT_{\max} - DT_{\min}}, \\ U_{\text{SH}} = \frac{2^{\text{GCR}} - U'_{\text{SH}} - 1}{2^{\text{GCR}} - 1}, \\ U'_{\text{SH}} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}, \end{cases} \quad (10)$$

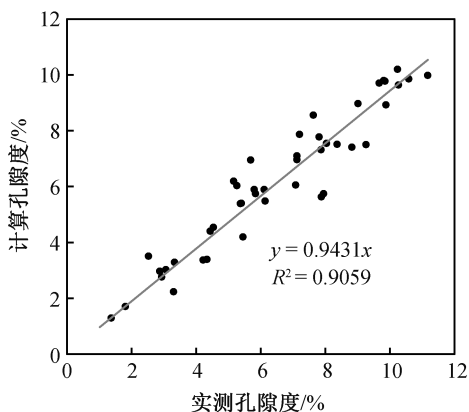


图3 研究区样品孔隙度计算值与实测值的关系

Fig. 3 Correlation between calculated values and measured values of porosity of the samples in the study area

其中, DT_3 为式(9)的第一项(无量纲); GR_3 为式(9)的第二项(无量纲); $GCUR$ 为 Hilchie 指数, 在该研究层段的取值为 2; U'_{SH} 为经过标准化的 GR 值。

改造后的 DT 值大于改造后的 GR 值, 表明该层位发育一定的孔隙, 可能预示存在砂岩储层, 两者的差值越大, 表示砂岩储层的孔隙度越大, 则有良好储层的可能性极大。这样, 也解释了无量纲交会法的本质及合理性。

1.3 无量纲交会法 3 种实现路径的比较

经验试错法的优点是, 在有前人研究资料的情况下, 可将已有公式应用到类似区块中, 省去试错的时间和精力, 缺点是遇到新的区块时通常需要不断重新赋值, 并反复验证公式的准确性。基于储层非均质性的归一化法的优点是可以保证将研究区不同的井和同一口井的各个层段改造成新曲线的公式适合其地质状况, 缺点是需要对每口井进行精细的地质解释和分层, 并对计算机性能要求较高。声波孔隙度法揭示了无量纲交会法的实质, 但其应用流程较繁琐。在油气田勘探开发实践中, 在条件允许的情况下, 可将这 3 种改造方法相结合来运用。

2 建立“甜点”指数

无量纲交会法是通过自然伽马曲线和声波时差曲线的改造, 直观地评价致密砂岩储层的品质, 但该方法受人为因素的影响, 在判断储层优劣时存在不足。本研究在无量纲交会法的基础上, 建立定量评价致密砂岩储层的“甜点”指数。

2.1 基于无量纲改造路径的“甜点”指数

关于致密砂岩储层定量评价的标准目前研究较

少。本文结合研究区长 7 油层组致密砂岩储层非均质性较强的特点, 在基于储层非均质性的归一化法改造路径的基础上, 求算该油层组各深度处改造后的声波时差值与自然伽马测井值之差, 并进行标准化处理, 得到非均质性评价指标(HEI), 以此作为致密砂岩储层定量评价的判别标准。HEI 的计算公式如下:

$$\begin{cases} HEI' = DT_2 - GR_2, \\ HEI = \frac{HEI' - HEI'_{\min}}{HEI'_{\max} - HEI'_{\min}}, \end{cases} \quad (11)$$

式中, HEI' 为非均质性评价指标未标准化的原始值, HEI'_{\max} 为非均质性评价指标未标准化的最大值, HEI'_{\min} 为非均质性评价指标未标准化的最小值。

2.2 基于孔隙度和渗透率的“甜点”指数

孔隙度和渗透率是影响致密砂岩储层性能的决定性因素, 各种表征致密砂岩储层微观孔喉结构的参数均可归结为对孔隙度和渗透率及其相互关系的描述。本文采用灰色关联分析法, 对孔隙度和渗透率这两个参数分别赋予权重, 从而建立一个综合表征致密砂岩储层物性的指标。

首先, 根据上述 47 个样品的数据(图 4)建立研究区孔隙度与渗透率的关系式:

$$K = 10^{0.0672\phi - 1.0972}, \quad (12)$$

式中, K 为渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

然后, 结合灰色关联分析法, 选取研究区 200 口井的数据进行如下处理: 1) 选定渗透率作为参考序列, 孔隙度为比较序列; 2) 对孔隙度和渗透率序

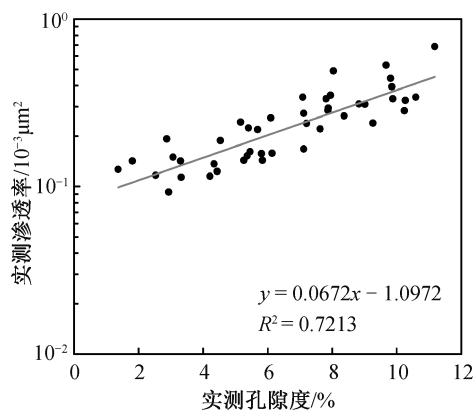


图4 研究区样品渗透率实测值与孔隙度实测值的关系

Fig. 4 Correlation between measured values of permeability and porosity of the samples in the study area

列进行归一化处理, 组成矩阵; 3) 确定孔隙度比较序列与渗透率参考序列对应元素差值绝对值的二级最小值; 4) 计算关联系数, 并求取灰色关联度。

最后, 根据灰色关联度计算结果, 分别求取研究区孔隙度和渗透率的权重系数:

$$W_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad (i = 0, 1), \quad (13)$$

式中, W_i 为权重系数(无量纲), r_i 为灰色关联度(无量纲)。由孔隙度和渗透率综合评价致密砂岩储层的“孔-渗综合评价指标(PPI)”可定义为

$$PPI = W_\phi \phi' + W_K K', \quad (14)$$

式中: ϕ' 为经过标准化的孔隙度值(无量纲), K' 为渗透率标准化后的值(无量纲)。

3 实例验证及应用

3.1 储层综合评价效果论证

选取研究区某井的长 7 油层组, 分别绘制经验试错法、基于储层非均质性的归一化法和声波孔隙度法对应的无量纲交会图以及岩性剖面图, 并绘制

非均质性评价指标和孔-渗综合评价指标曲线, 相互补充修正后, 可进行致密砂岩储层的综合评价(图 5)。

根据交会图和“甜点”指数综合评价效果可知, 该井的长 7 油层组下部, 砂岩储层性能一般; 长 7 油层组中部, 除顶端发育一套物性相对较好的砂岩储层外, 其他层位均为极差储层; 长 7 油层组上部, 自然伽马曲线与声波时差曲线的幅度差较大, 多数“甜点”指数处于相对高值, 为中等-好储层, 是实际射孔产层段。上述结果与自然电位(SP)曲线显示的特征和油田现有生产资料较吻合, 印证了该方法的准确性。

3.2 致密砂岩储层类型划分

计算得到目标区块 200 口井长 7 油层组致密砂岩储层的孔-渗综合评价指标, 主要分布在 0.1~1 之间, 其累积概率曲线(图 6)出现明显的分段特征, 表明这 4 段沉积物的粒度和成因环境有显著区别, 导致储层品质的差异。

依次计算 PPI 为 0.55, 0.40 和 0.22 时对应的孔隙度和渗透率, 结合对研究区的统计结果以及前人对

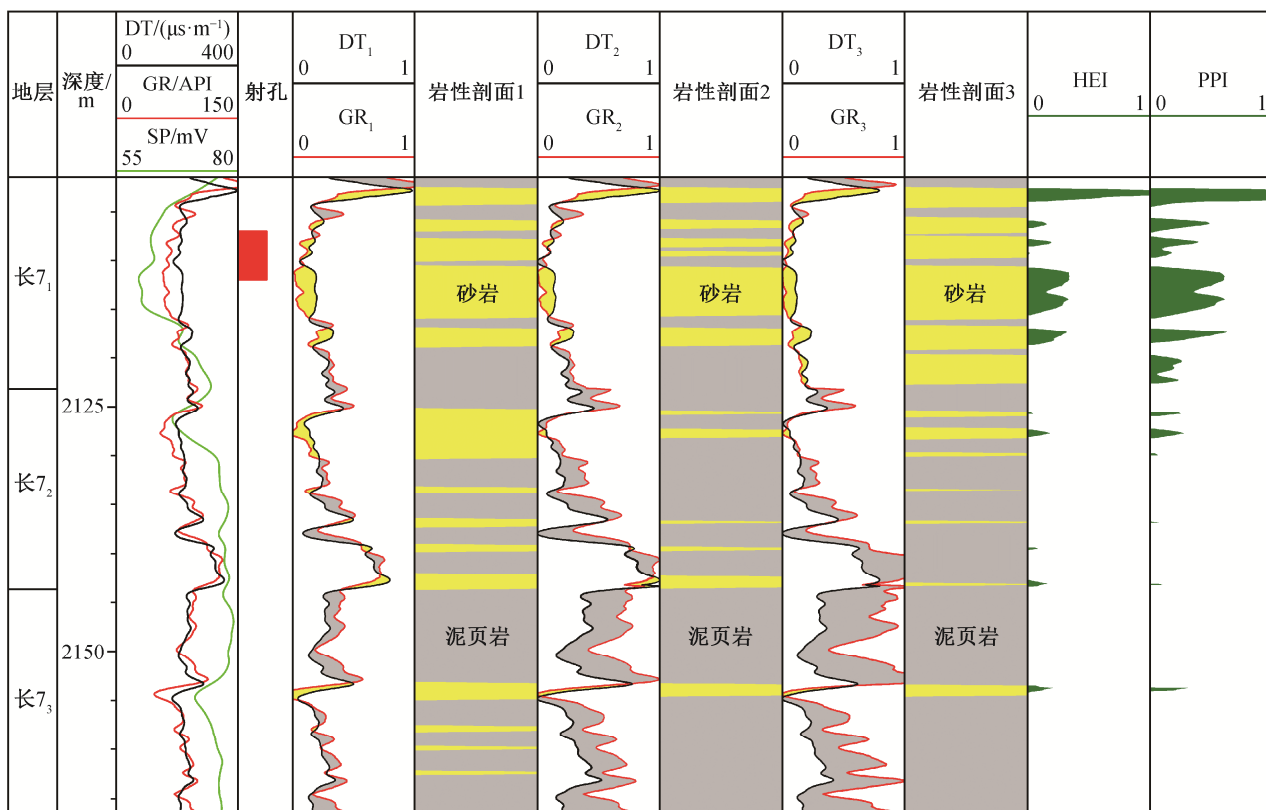


图 5 研究区某井长 7 油层组致密砂岩储层综合评价

Fig. 5 Comprehensive evaluation diagram of Chang-7 tight sandstone reservoirs of a well in the study area

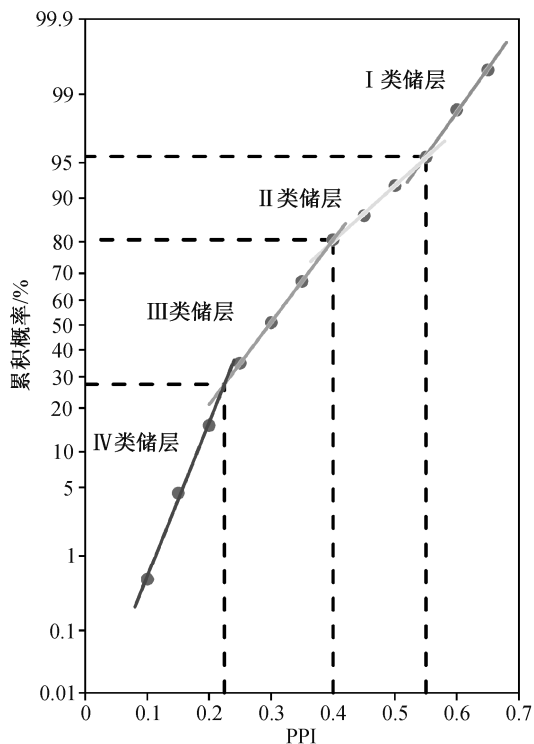


图 6 研究区致密砂岩储层“甜点”指数累积概率曲线
Fig. 6 Cumulative probability graph of “sweet spot” index in tight sandstone reservoirs in the study area

我国致密储层孔-渗上限的研究结果^[7,43], 将该区块的致密砂岩储层分为4类(表 1)。

3.3 储层演化规律

计算研究区 200 口井长 7 油层组致密砂岩储层段的孔-渗综合评价指数, 得到长 7₁ 油层、长 7₂ 油层和长 7₃ 油层的储层分类平面图(图 7)。结合无量纲

表 1 研究区致密砂岩储层分类标准

Table 1 Classification standard of tight sandstone reservoirs in the study area

储层类型	孔-渗综合评价指数	孔隙度/%	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	占比/%
I 类	>0.55	8.20~12.00	0.51~1.00	4.50
II 类	0.40~0.55	6.33~8.20	0.31~0.51	15.00
III 类	0.22~0.40	4.35~6.33	0.19~0.31	53.04
IV 类	<0.22	0~4.35	0.08~0.19	27.46

交会法(不进行曲线改造, 仅起辅助作用), 选择横跨研究区的两条剖面(图 8)分析其纵向演化过程。

研究区储层总体上沿东北-西南向展布, 物性普遍较差, 非均质性强, 主要储层类型(III类和 IV 类)分布广泛, 不同时期沉积的砂体经常纵向上叠置, 横向上连片分布, 形成多个砂体群, 累计厚度最大可达 60 m。

I 类和 II 类储层可作为该区的“甜点”, 在长 7 油层组各个演化时期都呈零星状分布, 平面上呈“土豆状”, 砂体侧向连续性较差。

长 7₃ 油层的 I 类和 II 类储层分布面积最小, 散落在研究区边缘, 砂体呈孤立状, 常横向挤压到烃源岩中, 分布不稳定, 属于半深湖-深湖沉积相。

长 7₂ 油层的 I 类和 II 类储层向研究区中心位, 砂体厚度较薄, 频繁地与烃源岩纵向叠置, 属于深水三角洲相。

长 7₁ 油层的 I 类和 II 类储层相对最为发育, 砂体数量和面积均有所增加, 三角洲平原相逐渐居于主导地位。

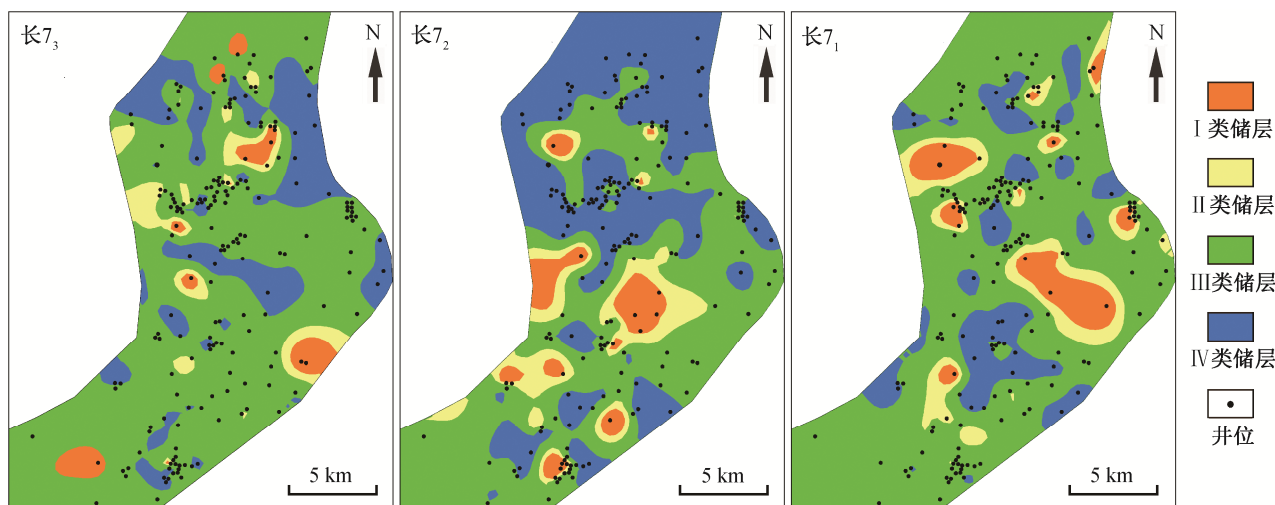


图 7 研究区致密砂岩储层类型的平面分布
Fig. 7 Classification plane of tight sandstone reservoirs in the study area

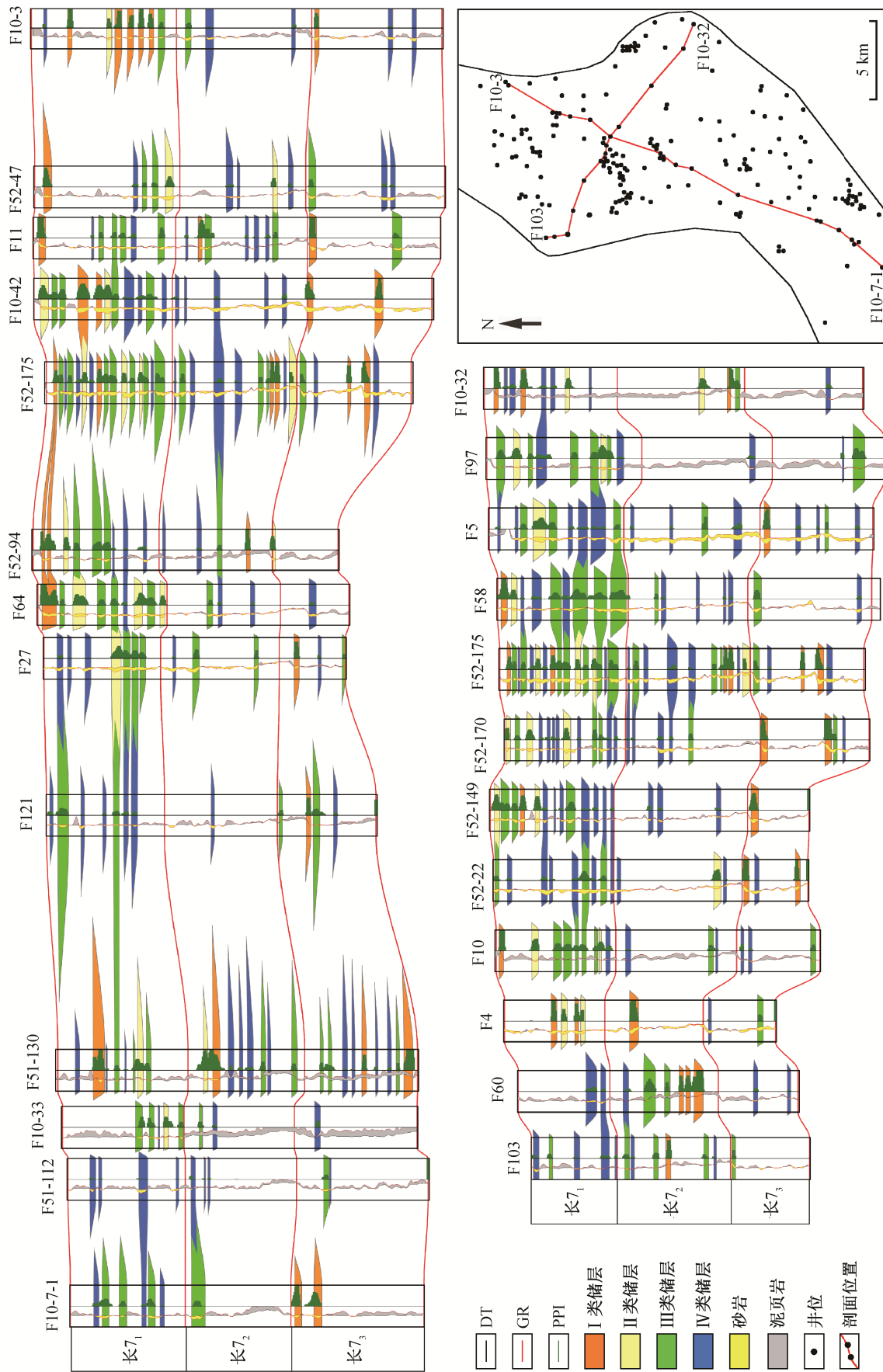


图 8 研究区致密砂岩储层类型的纵向分布
Fig. 8 Longitudinal distribution of tight sandstone reservoirs classification in the study area

上述结论可有效地预测“甜点”分布的区域和层位,指导油田现场进行高效的大规模井位部署。

4 结论

本文以鄂尔多斯盆地某油田区块为研究对象,综合运用无量纲交会法和“甜点”指数判别法,对研究区储层进行分类评价及“甜点”预测,得到以下主要结论。

1) 无量纲交会法是通过改造后的自然伽马曲线和声波时差曲线幅度差,直观地判断致密砂岩储层性能的优劣,其3种改造路径(经验评价法、基于储层非均质性的归一化法和声波孔隙度法)各有优缺点,在油田生产实践中应根据实际需要,选择适当的方法。

2) 依据基于储层非均质性的归一化法改造路径建立的非均质性评价指标以及通过赋予孔隙度和渗透率权重建立的孔-渗综合评价指标均可定量地评价致密砂岩储层的性能。由于包含取芯并样品的实际孔渗值,孔-渗综合评价指标的可信度相对较高。在实际应用中,这两个“甜点”指数可结合无量纲交会图及石油工程地质资料,互相修正和补充后综合运用,最大限度地提高石油采收率。

3) 根据孔-渗综合评价指标制定的储层分类方案与研究区油田生产实际情况吻合较好,可供该油田及周边地区使用;综合运用孔-渗综合评价指标及无量纲交会法对研究区的储层评价及预测结果与前人相关研究成果一致,可以有效地指导下一步油田开发方案的制定。

参考文献

- [1] Holditch S A. Unconventional oil and gas resource development — let's do it right. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2013, 1/2: 2-8
- [2] Gaswirth S B, Marra K R. U.S. Geological Survey 2013 assessment of undiscovered resources in the Bakken and Three Forks Formations of the U. S. Williston Basin Province. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(4): 639-660
- [3] Wustefeld P, Hilse U, Koehrer B, et al. Critical evaluation of an Upper Carboniferous tight gas sandstone reservoir analog: diagenesis and petrophysical aspects. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 689-710
- [4] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 129-136
- [5] 田继先, 曾旭, 易士威, 等. 咸化湖盆致密油储层“甜点”预测方法研究: 以柴达木盆地扎哈泉地区上干柴沟组为例. *地质前缘*, 2016, 23(5): 193-201
- [6] 朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等. 致密储层研究进展和热点问题分析. *地质前缘*, 2018, 25(2): 141-146
- [7] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. *石油学报*, 2012, 33(3): 343-350
- [8] 苏尔古伊耶夫, 热托夫, 科瓦列夫, 等. 低渗透油田开发的问题和原则 // 杨俊杰. 低渗透油气藏勘探开发技术. 北京: 石油工业出版社, 1993: 136-137
- [9] Holditch S A. Tight gas sands. *Journal of Petroleum Technology*, 2006, 58(6): 86-93
- [10] Li T T, Hou S Y, Wen H J, et al. Reservoir classification of tight sandstone and its micro-nano pores characteristics, Songliao Basin, Northeast China. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017, 17(9): 6404-6410
- [11] Feng Z H, Shao H M, Wang C, et al. Pore structure characterization and classification of in-source tight oil reservoirs in Northern Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89(1): 29-30
- [12] Zou C N, Yang Z, Hou L H, et al. Geological characteristics and “sweet area” evaluation for tight oil. *Petroleum Science*, 2015, 12(4): 606-617
- [13] Li M, Yang H E, Lu H J, et al. Investigation into the classification of tight sandstone reservoirs via imbibition characteristics. *Energies*, 2018, 11(10): 2619-2631
- [14] 林铁锋, 康德江. 松辽盆地三肇凹陷扶余油层致密储层分类精细评价. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 686-693
- [15] 郑磊, 金之均, 张哨楠. 中东鲁卜哈利盆地古生界致密砂岩储层特征及评价. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 475-482
- [16] 蔡来星, 卢双舫, 张训华, 等. 基于孔喉结构建立致密砂岩储层评价方案——以松南中央拗陷泉四段为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(6): 1654-1667
- [17] 张安达, 王成, 乔睿, 等. 致密砂岩储层物性下限确定新方法及其系统分类. *岩性油气藏*, 2014, 26(5): 5-8
- [18] 徐兆辉, 汪泽成, 徐安娜, 等. 四川盆地须家河组致密砂岩储集层特征与分级评价. *新疆石油地质*, 2011, 32(1): 26-28
- [19] Shi B B, Chang X C, Yin W, et al. Quantitative evaluation model for tight sandstone reservoirs based on statistical methods — a case study of the Triassic

- Chang 8 tight sandstones, Zhenjing area, Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 601–616
- [20] Tao L, Guo J C, He N, et al. A new approach for tight oil reservoir quality evaluation using a comprehensive evaluation factor. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, 28(2A): 1586–1593
- [21] Luo Y T, Yang Z M, Tang Z X, et al. Longitudinal reservoir evaluation technique for tight oil reservoirs. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, doi: 10.1155/2019/7681760
- [22] Zhu P, Zhu Z Q, Zhang Y Y, et al. Quantitative evaluation of low-permeability gas reservoirs based on an improved fuzzy-gray method. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(3): 1–15
- [23] Zhan L F, Guo B C, Yu Y J, et al. Source-reservoir chart for tight oil sweet spots evaluation and its application in Permian of Jimsar Sag, Junggar Basin. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019: 1–9
- [24] 周翔, 何生, 刘萍, 等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 6 致密油储层孔隙结构特征及分类评价. *地学前缘*, 2016, 23(3): 253–265
- [25] 李潮流, 李长喜, 候雨庭, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段致密储集层测井评价. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 608–614
- [26] 贾培锋, 杨正明, 肖前华, 等. 致密油藏储层综合评价新方法. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 33–36
- [27] 赵继勇, 樊建明, 薛婷, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油储层特征及分类评价研究. *西北大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(6): 857–866
- [28] 陈文浩, 董少群, 王志章, 等. 致密砂岩地震储层质量评价方法研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(3): 63–68
- [29] 张广权, 胡向阳, 陈舒薇, 等. 致密低渗砂岩储层定量评价方法. *天然气地球科学*, 2016, 27(12): 2147–2153
- [30] 冯利娟, 蒋志斌, 钱川川, 等. 低渗透砂岩储集层分类及渗透率测井评价——以石南 21 井区头屯河组油藏为例. *新疆石油地质*, 2018, 39(2): 163–168
- [31] 潘保芝, 房春慧, 郭宇航, 等. 基于岩石物理转换模型的苏里格致密砂岩储层测井评价与产能预测. *地球物理学报*, 2018, 61(12): 5115–5124
- [32] Guo Q L, Wang S J, Chen X M, et al. Assessment on tight oil resources in major basins in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 45(4): 737–748
- [33] Lai J, Wang G W, Ran Y, et al. Impact of diagenesis on the reservoir quality of tight oil sandstones: the case of Upper Triassic Yanchang Formation Chang-7 oil layers in Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 145: 54–65
- [34] Dou W C, Liu L F, Wu K J, et al. Diagenetic heterogeneity, pore throats characteristic and their effects on reservoir quality of the Upper Triassic tight sandstones of Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 243–257
- [35] 王建强, 刘池洋, 郭真, 等. 鄂尔多斯盆地中南部晚三叠世延长期区域构造环境转变的沉积响应. *地学前缘*, 2015, 22(3): 194–204
- [36] 杨华, 邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 513–520
- [37] Montgomery J B, O’Sullivan F M. Spatial variability of tight oil well productivity and the impact of technology. *Applied Energy*, 2017, 195: 344–355
- [38] Clarkson C R, Qanbari F. History matching and forecasting tight gas condensate and oil wells by use of an approximate semianalytical model derived from the dynamic-drainage-area concept. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2016, 19(4): 540–552
- [39] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 737–748
- [40] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics*, 1958, 23(3): 459–493
- [41] Angeleri G P, Carpi R. Porosity prediction from seismic data. *Geophysical Prospecting*, 1982, 30(5): 580–607
- [42] 潘和平, 马火林, 蔡柏林, 等. *地球物理测井与井中物探*. 北京: 科学出版社, 2008
- [43] Zhu R K, Zou C N, Mao Z G, et al. Characteristics and distribution of continental tight oil in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 178: 37–51