

· 方法与应用 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.3113

基于双能 CT 和 MaipSCAN 的岩石分类和 选样新方法

——以玛湖凹陷页岩油储层为例

周浩¹, 王晨辉², 时凤¹, 刘雯雯¹, 刘欢¹, 魏云¹, 郭彬², 张安振²,
符颖²

(1. 中国石油新疆油田, 新疆克拉玛依 834000; 2. 北京久泰福得科技有限公司, 北京 100029)

摘要: 以玛湖凹陷页岩油井段为研究对象, 基于全直径双能 CT 扫描和 MaipSCAN 矿物扫描电镜资料, 综合考虑岩石密度、光电指数和矿物参数, 运用聚类分析方法, 对传统页岩油储层取样和分类定量表征不足的问题进行了深入研究, 提出一种新的岩石分类方法, 并将其应用于优势储层识别。同时, 本文还创新提出了考虑宏观非均质性的有代表性样品选取方法和流程, 为选取有代表性的样品提供了依据。研究表明, 采用密度-光电指数分类的结果和矿物之间存在较好的一致性; 聚类分类方法可以考虑矿物变化, 有助于进一步精细选样; 斜长石含量高的层段含油性、物性等较好, 可作为地质甜点和工程甜点的标志。本文提出的分类方法和样品选取流程可靠, 为页岩油储层的系统评价提供了新的思路和方法, 具有重要的理论和实际意义。

关键词: 双能 CT; 光电指数/密度; 矿物识别; 岩石分类; 选样方法
中图分类号: P618.12; P585.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2025)01-0227-14

A new method for rock classification and sample selection based on dual-energy CT and MaipSCAN: A case study of shale oil reservoirs in the Mahu Depression

ZHOU Hao¹, WANG Chen-hui², SHI Feng¹, LIU Wen-wen¹, LIU Huan¹, WEI Yun¹, GUO Bin²,
ZHANG An-zhen² and FU Ying²

(1. PetroChina Xinjiang Oil field company, Karamay 834000, China; 2. Jiutaifude Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Due to the insufficiencies of traditional sampling and quantitative characterization methods for oil shale formation, this paper proposed a new approach for rock classification and sample selection based on the study of the shale oil well section in the Mahu Depression. The approach combines dual-energy CT and MaipSCAN mineral scanning electron microscopy data and takes into account rock density, photoelectric index, and mineral identification. Clustering analysis is utilized for the classification. The proposed method is then applied to identify prevalent formations. An innovative representative rock sample selection method and process are introduced that considers macroscopic heterogeneity. The results show good consistency between the photoelectric index-density classification

收稿日期: 2023-08-12; 接受日期: 2023-11-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 新疆砾岩油藏实验室开放性项目(2020D04045)

作者简介: 周浩(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气田开发室内实验工作, E-mail: zh0823@petrochina.com.cn; 通讯作者:
符颖(1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事数字岩心研究工作, E-mail: tianxing0377@126.com。

网络首发时间: 2024-07-19; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240717.0912.002.html>

and minerals, and the clustering classification method is capable of further fine sample selection. Layers with high plagioclase content exhibit better oil and physical properties and can serve as geological and engineering sweet spots. The proposed classification method and sample selection process are reliable and provide new ideas and methods for the systematic evaluation of oil shale reservoirs.

Key words: dual-energy CT; photoelectric index/density; mineral identification; rock classification; sample selection method

Fund support: The Open Project of Conglomerate Reservoir Laboratory in Xinjiang (2020D04045)

中国拥有丰富的陆相页岩油资源,它们是中国重要的石油接替资源,有效识别甜点段是页岩油高效勘探开发的关键(邹才能等, 2022; 潘松圻等, 2023)。目前,对于甜点段或者优势储层的定量评价参数,宏观尺度主要包括构造背景、沉积相、资源丰度、厚度等,而在微观尺度则需要深入研究岩石矿物组成(岩性岩相)、有机质含量 TOC、热演化成熟度 R_0 、孔渗饱等参数。其中,岩性和岩相组合是油层分类评价的关键参数之一(兰叶芳等, 2021; 孙龙德等, 2023)。

岩性是储层物性评价的基础,但传统的储层岩性评价方法可能会导致较好的储层被忽略。例如,薄片观察法和 X 射线衍射法无法进行对粒度和岩屑的定量分析,这导致鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油优势储层的岩性是否是砂岩还是页岩存在争议(王晓雯等, 2021; 夏文鹤等, 2023)。因此,需要采用更加精确的分析和评价手段,才能有效识别页岩油优势储层(王成荣等, 2022)。本文以玛湖凹陷页岩油井段为研究对象,采用全直径双能 CT 扫描技术和 MaipSCAN 矿物扫描电镜资料,结合标准样品和相关算法,定量计算岩心深度方向的密度、光电吸收截面指数(PE 指数)和矿物组成,并使用聚类分析方法构建了一种新的岩石分类方法。该方法可以应用于优势储层识别和非均质性研究,从而更加准确地识别页岩油优势储层。

1 储层岩石学特征

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西部,是一个二级构造单元,北部紧邻哈拉阿拉特山,西侧延伸至乌夏断裂和克百断裂带,东侧与夏盐凸起、英西凹陷相邻,南接中拐凸起和达巴松凸起,总面积约为 5 000 km²(刘得光等, 2020)。目的层风城组为碱湖沉积,其

地层岩性变化复杂,沉积构造多变,总体向凹陷内倾斜,为西北厚、东南薄的地层楔型地质体(图 1)。风一段沉积期为成碱初期阶段,自西北向东南减薄,岩性主要为深灰色白云质页岩、泥质白云岩、页岩,夹薄层灰色、深灰色、灰黑色泥质粉砂岩、凝灰岩和混积岩;风二段沉积期为成碱高峰阶段,发育白云质页岩、泥质白云岩,夹泥质粉砂岩和混积岩,以大量碱性蒸发岩矿物的存在为特征;风三段沉积期为成碱消亡阶段,发育灰色页岩、白云质页岩、泥质粉砂岩、白云质粉砂岩,夹泥质白云岩和碱性蒸发岩。在风城组中,风二段沉积期碳酸盐矿物含量最高,对应于湖盆的收缩期,碱湖发育达到最高峰(曹剑等, 2015; 支东明等, 2019; 刘得光等, 2020; 李兆丰等, 2021; 孟颖等, 2022)。

本次研究选取 MY1H 风三段第 7 回次共计 15.4 m 的岩心(图 2)进行全直径双能 CT 扫描及矿物定量分析研究。该岩心段自下而上,录井岩性为含泥粉砂岩、云质粉砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥砂质互层,总体特征为细粒沉积,部分层段发育毫米级纹层,裂缝发育较少,只在少量岩心处可见方解石充填或半充填裂缝,局部可见白云石颗粒分布,岩心内部可见泥质条带和灰质条带交互沉积,呈现水平层理,岩心内亮灰色区域加弱酸起泡。该段岩心出筒时个别见黑褐色中偏重质原油和针孔状气泡,油气味淡,油脂感弱,微染手,滴水缓渗。样品实测孔隙度在 2.1%~10.4%之间,渗透率 0.01~9.53 mD 之间。

常规实验通常用光学薄片鉴定方法对岩性进行命名,从图 3 中可以看出,MY1H 井第 7 回次岩性主要为凝灰质(含云)细粒/极细粒岩屑砂岩、沉凝灰岩、云质(凝灰质)硅质岩。凝灰质晶屑主要为长石,岩屑为凝灰岩和安山岩;白云石呈细晶或粉晶状;硅质呈团块状或条带状,硅质晶间孔发育,沥青质充填。光学薄片鉴定时通常放大倍数为 50~200 倍,扫

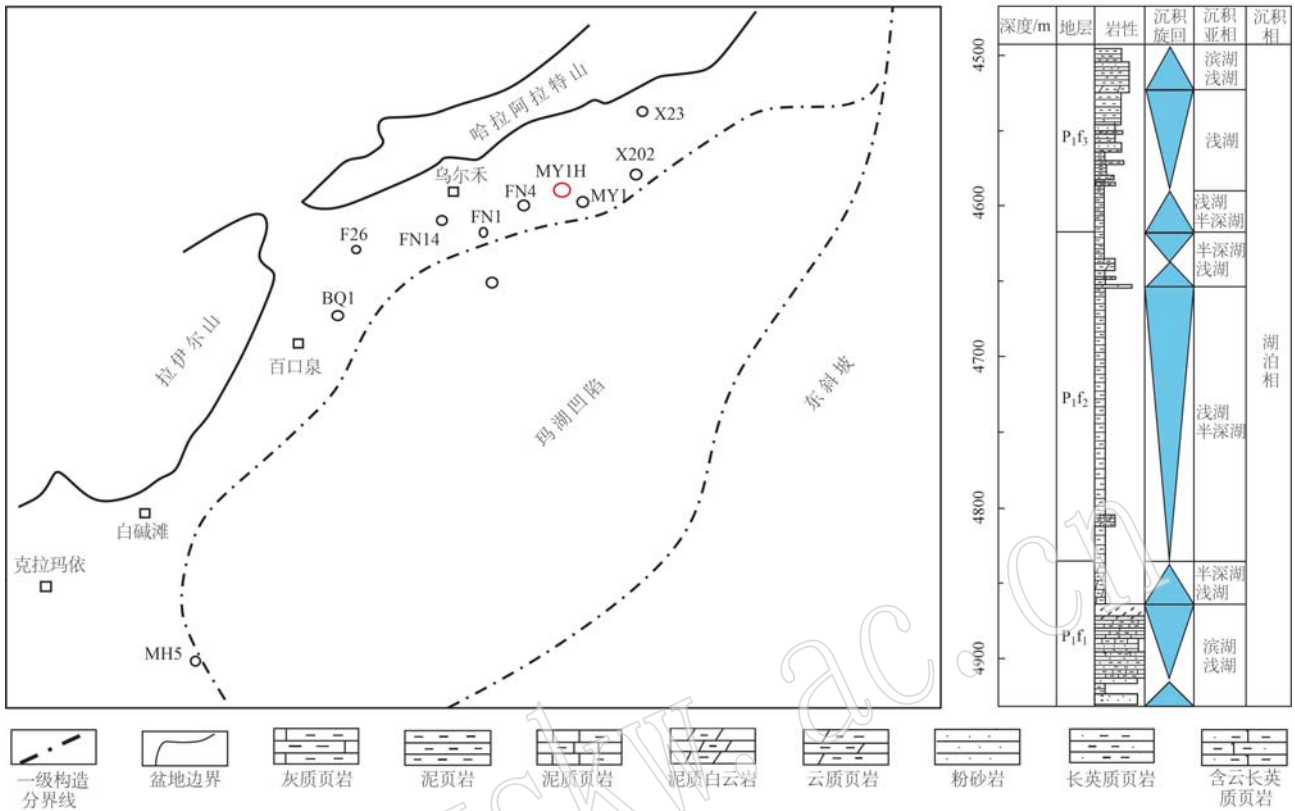


图 1 玛湖凹陷构造位置及风城组地层特征[依据李兆丰等(2021)修改]

Fig. 1 The structural position of the Mahu Depression and stratigraphic characteristics of the Fengcheng Formation (modified from Li Zhaofeng *et al.*, 2021)



图 2 MY1H 井风三段第 7 回次岩心照片(红色三角为选样点)

Fig. 2 Core photograph of the 7th interval of the Fengsan member in the well MY1H (the red triangles indicate sampling points)

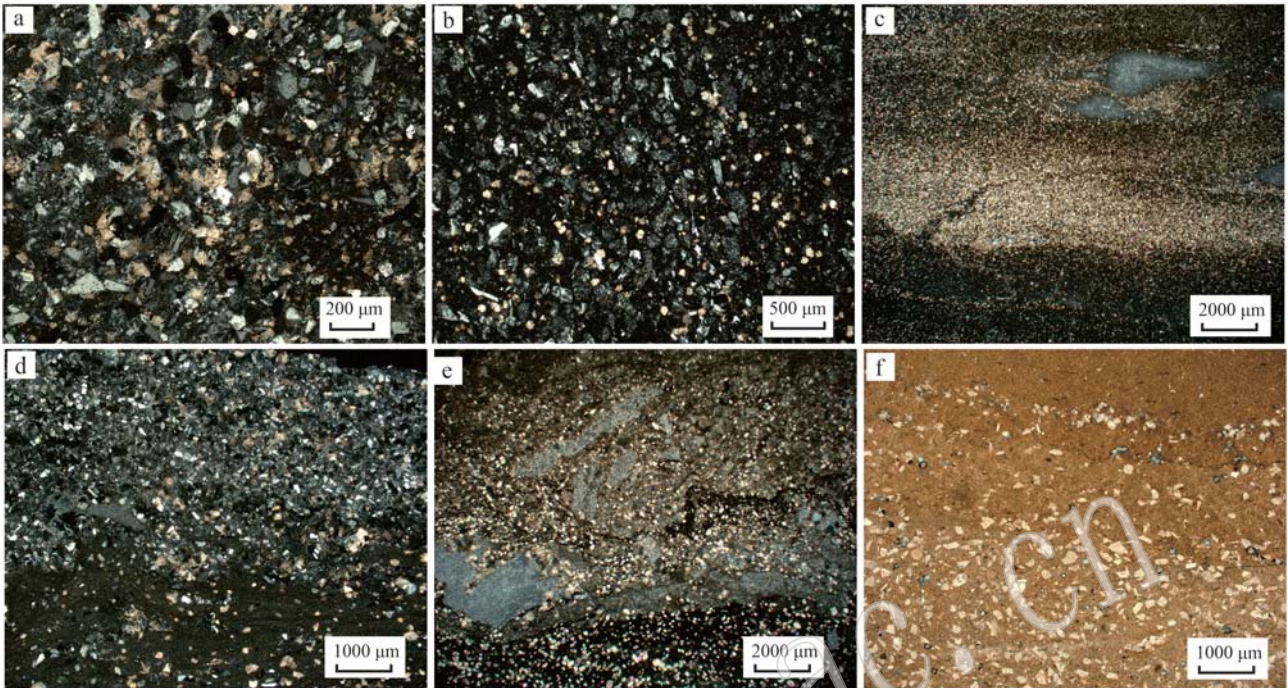


图3 MY1H井风三段第7回次岩心光学薄片照片

Fig. 3 Microphotographs of the 7th core thin section of the Fengsan member in the well MY1H

a—凝灰质含泥极细粒岩屑砂岩, 4 561.28 m, 正交偏光; b—沉凝灰岩, 4 562.73 m, 正交偏光; c—云质硅质岩, 4 564.13 m, 正交偏光; d—沉凝灰岩, 4 567.14 m, 正交偏光; e—含泥云质硅质岩, 4 570.25 m, 正交偏光; f—凝灰质硅质岩, 4 572.17 m, 单偏光
a—fine-grained tuffaceous argillaceous lithic sandston, 4 561.28 m, crossed polarized light; b—sedimentary tuff, 4 562.73 m, crossed polarized light; c—dolomitic siliceous rock, 4 564.13 m, crossed polarized light; d—sedimentary tuff, 4 567.14 m, crossed polarized light; e—argillaceous dolomitic siliceous rock, 4 570.25 m, crossed polarized light; f—tuffaceous siliceous rock, 4 572.17 m, plane-polarized light

描精度最高仅到微米级,对于这些细粒沉积段的岩心鉴定存在观察精度不高、识别度不够的问题;同时,从图2岩心照片上可见,MY1H井纵向上岩性变化较快,光学薄片的样品选取也会造成样品点遗漏、纵向矿物分布认识不清的问题。因此,需结合一些新的技术手段对岩心的纵向矿物分布进行更系统性的研究。

2 油页岩分类方法

本节介绍一种新的岩石分类方法,通过使用双能CT和MaipSCAN矿物扫描电镜资料,计算岩石密度、光电指数和矿物等参数,并运用聚类分析方法对油页岩进行分类。本节主要介绍和该方法相关的实验仪器以及如何获取参数等基础资料。

2.1 分析仪器

本研究使用的主要仪器是全直径双能CT扫描仪和MaipSCAN自动矿物学电镜(图4)。全直径岩心双能CT扫描仪是一种用于研究岩石孔隙结构和物性的高分辨率三维成像技术,它利用岩心样品通

过X射线或伽马射线的吸收、散射和衰减特性,获取岩石内部的结构信息。与传统的单能CT扫描相比,全直径岩心双能CT扫描可以通过获取两种不同能量的射线数据,来消除岩石内部的散射影响,从而提高成像质量和分辨率。本文全直径岩心的双能CT扫描采用Ingenuity Core 64层螺旋CT,扫描分辨率0.8~1 mm,扫描能量为100 kV和140 kV。

MaipSCAN自动矿物学电镜是国际最新一代自动矿物学分析系统,主要有三大优点:第一,该仪器可以针对每一个扫描点进行人工验证,以保证矿物分析结果的准确;第二,该仪器不仅可以扫描岩心,也可以扫描岩屑,通过能谱仪收集岩石样品特征X射线并利用人工智能技术,从而实现准确页岩矿物自动识别和定量分析;第三,该仪器可通过采集高清电子图像和使用先进的图像处理技术,实现孔缝特征定量分析及弹性参数定量分析(Dvorkin and Nur, 1996)。本文自动矿物分析采用中国科学院地球与物理研究所自研MaipSCAN自动矿物学电镜,矿物识别分辨率为2~64 μm,背散射图像分辨率为100 nm~2 μm。



图4 全直径双能 CT 扫描仪(左)和 Maipscan 自动矿物学电镜(右)

Fig. 4 The full diameter dual-energy CT scanner (left) and Maipscan automated mineralogy electron microscope (right)

2.2 光电吸收截面指数和密度的获取

密度和光电吸收截面指数是矿物学中常用的两个重要参数,可以用于矿物的识别和分类。不同矿物的密度不同,因此可以通过测量密度来进行矿物识别。光电吸收截面指数是指矿物对 X 射线或 γ 射线的吸收能力,不同矿物的吸收能力不同,因此也可以通过测量矿物的吸收截面指数来进行矿物识别。

一般来讲 X 射线或伽马射线与物质相互作用存在 3 种效应,即光电效应、康普顿效应和电子对效应。当光子能量 $h\nu < 100$ keV 时,以光电效应为主; $h\nu$ 在 100~2 000 keV 之间时,以康普顿效应为主; $h\nu > 2 000$ keV 时,以电子对效应为主。Wellington 和 Vinegar(1987) 首先提出将双能计算机断层扫描(DECCT)应用到矿物学鉴定中,并将其添加到地层评估工作流程中,为岩石矿物成分提供了非常重要的鉴定工具,后来 Landry 等(2011)、Haghighi 等(2011)、Alves 等(2015)、Jussiani 和 Appoloni(2015) 对该技术进行了重新改进,使其作为一种无损测量方法,可以评估岩石成分的空间分布,并能够对储层岩石进行定量分析。

衰减系数依赖于入射 X 射线光子束的能量。一般来说,能量越高,穿透力就越强,衰减效应就越低。衰减系数可以通过结合原子序数的实验结果来计算(Grieken and Markowicz, 1993),质量衰减系数必须乘以质量密度以确定线性衰减系数。Ketcham 和 Carlson(2001) 在采用 CT 扫描地质样本时,绘制了

不同成分材料在可用 X 射线光谱范围内的线性衰减系数(图 5)。图 5 显示了石英、正长石、方解石和铁铝榴石矿物的线性衰减系数曲线。石英和正长石的密度非常相似(2.65 g/cm³ 和 2.59 g/cm³),但在低能时,由于长石中存在相对较高的钾原子,它的衰减系数高于石英,随着 X 射线能量的增加,它们的衰减系数收敛,并且在大约 125 keV 时交叉,能量到达 125 keV 后它们几乎无法区分(图 5)。方解石的密度虽然只比石英和正长石稍高一些(2.71 g/cm³),但由于钙的存在,其衰减性明显更强,在能量加载到

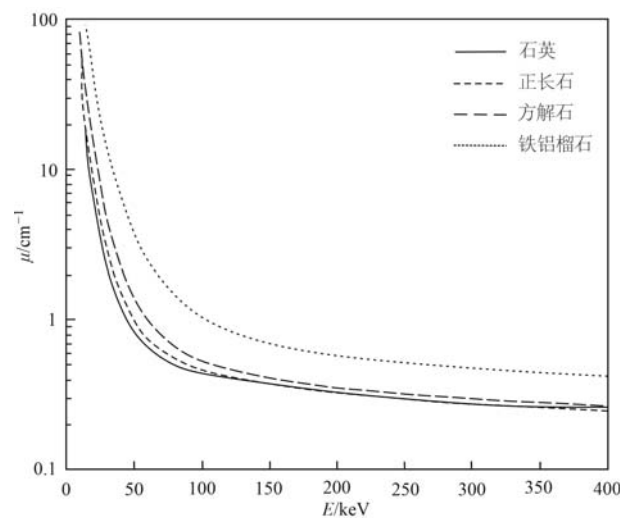


图5 4种成岩矿物的线性衰减系数和 X 射线能量的关系
Fig. 5 The relationship between linear attenuation coefficients of four diagenetic minerals and X-ray energy

200 keV 之前,与石英始终存在较大差值,这表明在 200 keV 之前,能将两者很好地区分开来。

如果仅用低能量 X 射线扫描时,因 X 射线穿透能力较低会导致更大的图像噪声,成像质量不高,而仅用高能量 X 射线时对矿物又不能进行很好的区分。因此,为了更好地将不同矿物区分开来,需要以不同的能量对样品进行两次扫描,以帮助分离密度对原子序数的影响(Ketcham, 2005)。目前,双能 CT 扫描方法应用最多的是在页岩储层中,特别是陆相页岩储层,纵向矿物成分变化较大,钙质页岩、长英质页岩、黏土质页岩、砂质夹层和钙质夹层在不同能量 X 射线穿透下均有密度和原子序数的变化,通过计算能较好地将其区分开来。

因此,运用全直径 CT 对岩心进行 100 keV 和 140 keV 的扫描,通过对康普顿效应和光电效应的解耦计算可以获取岩心内部的密度和光电指数(Chang *et al.*, 2012; Alves *et al.*, 2014; Rodolfo, 2017),计算公式如下:

$$\mu = \rho Z^n \alpha + \rho \beta$$

其中, μ 为物质的吸收系数(HU); Z 为有效原子数; ρ 表示物质的密度(g/cm^3), α, β 为系数; n 在此取 3.8。

要想得到多种矿物组合的岩心的光电指数,需先对已知有效原子数 Z 和密度 ρ 的标准样品进行扫描,计算出 μ, α 和 β 值,然后代入 100 keV 和 140 keV 两种扫描能量下岩心的 E 值对 ρ 和 Z 进行计算,本次扫描中运用的标准样品有石英、铝棒和 PVC。

$$Pe = (Z/10)^{3.6}$$

其中, Pe 表示光电吸收截面指数。

2.3 聚类分析

通过双能 CT 扫描后的图像差值可以计算出岩石的密度和光电指数,并绘制两类参数交会图,从而对岩心进行分析。聚类分析是一种无监督学习方法,其目的是按照某个特定标准(如距离),将数据集中的样本分成相似的类或簇,使得同一类别内的样本相似度高,不同类别之间的相似度较低。本文采用基于中心点的 K 均值聚类方法对两类参数进行分类。首先随机选择 k 个中心点,将每个样本分配到距离其最近的中心点所在的簇中,然后重新计算每个簇的中心点,并重新分配样本到距离其最近的中心点所在的簇中。不断重复这个过程,直到簇

的中心点不再发生变化或达到最大迭代次数为止(王海玲等, 2022; 李明倩等, 2023; 周湘贞等, 2023)。

假设 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为聚类样本, x_i 为 d 维向量(王海玲等, 2022), k 个节点的聚类中心记作 $k = (k_1, k_2, \dots, k_j)$ 。其目标函数 $S = (s_1, k_2, \dots, k_j)$ 为

$$S_j = \operatorname{argmin}_j \|x_i - k_j\|^2$$

聚类中心坐标更新的公式为

$$k_j = (\sum_{i=1}^n u_{ij} \cdot x_i) / (\sum_{i=1}^n u_{ij})$$

式中, $\|x_i - k_j\|^2$ 为第 i 个样本到聚类中心 k_j 距离; 当第 i 个样本被划分到了第 j 类时, $u_{ij} = 1$, 否则为 0。直到聚类中心收敛,输出聚类结果聚类中心。

3 页岩油储层分类方法结果应用

3.1 全直径岩心密度/ Pe 分析

对 MY1H 井第 7 回次岩心进行全直径双能 CT 扫描后,依据不同能量下的 CT 值计算该段岩心的密度和光电指数 Pe 。图 6 展示了 MY1H 井密度和 Pe 聚类分析结果,玛湖 MY1H 井的岩石一共被分为 6 大类,分别对应不同的密度和 Pe 值。其中,1 类岩石密度在 $2.48 \sim 2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$, Pe 值在 $2.25 \sim 3$ 之间;2 类岩石密度在 $2.35 \sim 2.62 \text{ g}/\text{cm}^3$, Pe 值在 $3 \sim 3.8$ 之间;3 类岩石密度在 $2.6 \sim 2.78 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间, Pe 值在 $2.52 \sim 3.2$ 之间;4 类岩石密度在 $2.62 \sim 2.72 \text{ g}/\text{cm}^3$, Pe 值在 $3.2 \sim 3.8$ 之间;5 类岩石密度在 $2.7 \sim 3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间, Pe 值为 $3 \sim 4$;6 类岩石密度在 $2.6 \sim 3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间, Pe 值大于 4(图 6)。

由图 6 可以看出,采用 K 均质聚类得到的 6 大类岩石,具有明确的界限,其中 4 和 3 类所占比重最大,分别是 32% 和 26%,6 类所占的个数最少,仅为 1%。但是,6 类具有最高的 Pe 值,和其余几类岩石之间存在明显的界限。这也从侧面反映出 K 均值分类的内在正确性。另外,高 Pe 值表明岩石含有较高的碳酸盐类矿物。

将以上分析结果同岩心图像、CT 扫描灰度图像以及密度和 Pe 曲线进行对照验证,可以看出,随着岩心 CT 扫描图灰度的明暗变化,密度和光电指数 Pe 数值也随之发生改变,特别是在岩心内部纹层发育层段, Pe 值变化幅度比密度值变化幅度要大,能够更好地表征出岩心内部纵向上矿物成分的变化。

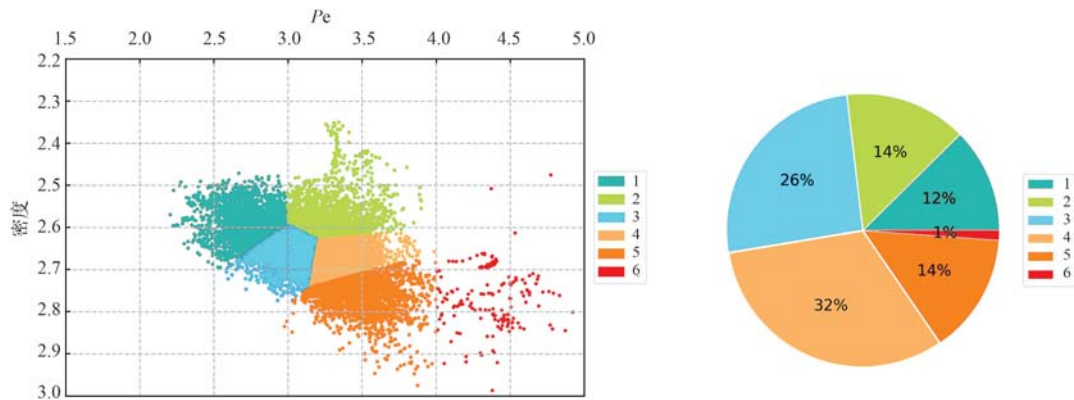


图 6 MY1H 井的 Pe 聚类分析结果(a)和各分类占比图(b)

Fig. 6 The clustering analysis results of Pe (a) and the proportion of classification (b) of MY1H well

一般来讲硅质含量高的层段在全直径 CT 扫描结果中显示低灰度值、低密度和低 Pe 的特点,随着碳酸盐类矿物的增多,密度和 Pe 曲线增大。样品选取时

考虑了聚类分析结果,结合岩心描述、全直径 CT 扫描结果、密度和光电指数曲线,对每种类型分别进行针对性取样,进一步确定了其矿物变化(图 7)。

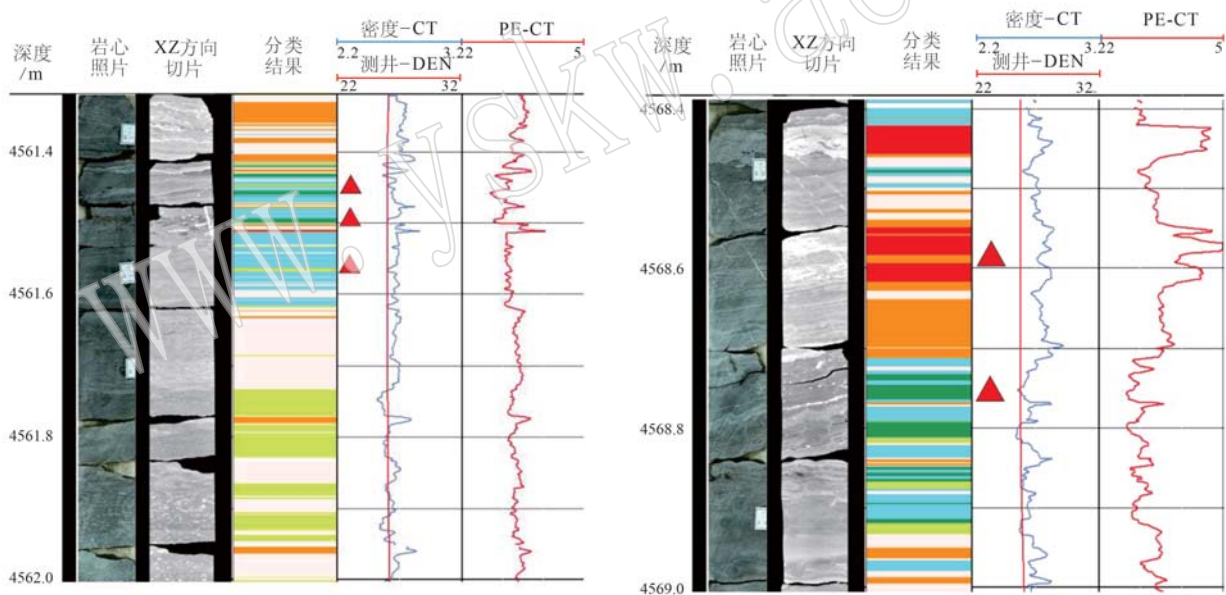


图 7 MY1H 井全直径 CT 扫描结果与分类(红色三角为样品选取位置)

Fig. 7 The scanning and clustering results of the full diameter CT of the well MY1H (the red triangles indicate sampling points)

为了更好地验证聚类分析结果,结合岩石分类结果选取样品进行了 MaipSCAN 矿物定量分析。从扫描结果来看,MY1H 井岩心主要矿物成分以石英、斜长石、钠长石为主,白云石含量次之,岩性命名为砂岩。白云石的含量从下到上表现出由少变多后变少的一个韵律特征,其中 8 到 15 号样品白云石含量较高(图 8)。

根据矿物定量分析及岩石类型验证结果(图 9~图 11),尽管样本岩性均为砂岩,但其矿物成分存在

差异。1 类岩石石英含量较高,最高达 82.83%,平均含量 71.02%; 2 类钾长石含量较高,最高达 69.03%,平均含量 56.95%; 3 类岩石斜长石含量较高,最高达 70.99%,平均含量 56.95%; 4 类岩石钾长石和斜长石含量差别不大,长石总含量较高,平均含量 67.21%; 5 和 6 类岩石整体碳酸盐类含量增加,平均含量 38.74%。

在图 9~图 11 中,除 14 号和 23 号样品因碳酸盐岩含量高导致密度值大于 2.70 g/cm^3 外,其他样品

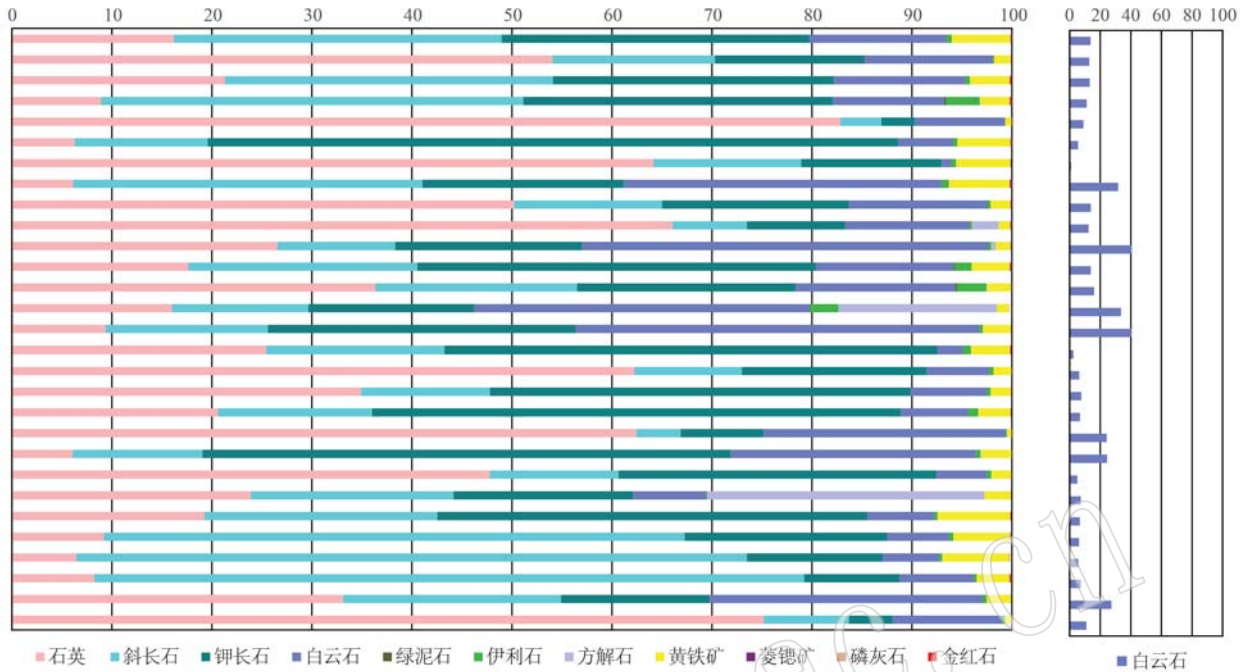


图 8 MY1H 井矿物定量分析结果

Fig. 8 The results of mineral quantitative analysis of the well MY1H

1类					2类				
样品编号	CT分类	矿物定量分析	各矿物含量占比	密度和Pe值	样品编号	CT分类	矿物定量分析	各矿物含量占比	密度和Pe值
MY1H-5	1		石英: 82.83% 长石: 7.45% 白云石: 9.01% 方解石: 0.01% 黏土: 0.05%	密度: 2.54 g/cm ³ Pe:2.52	MY1H-6	2		石英: 6.28% 长石: 82.33% 白云石: 5.54% 方解石: 0.01% 黏土: 0.39%	密度: 2.55 g/cm ³ Pe:3.51
MY1H-10	2		石英: 66.07% 长石: 17.23% 白云石: 12.45% 方解石: 2.66% 黏土: 0.26%	密度: 2.61 g/cm ³ Pe:2.67	MY1H-24	2		石英: 19.23% 长石: 66.32% 白云石: 6.67% 方解石: 0.01% 黏土: 0.35%	密度: 2.56 g/cm ³ Pe:3.20
MY1H-7	2		石英: 64.17% 长石: 28.79% 白云石: 0.94% 方解石: 0.06% 黏土: 0.5%	密度: 2.78 g/cm ³ Pe:3.34	MY1H-21	2		石英: 6.05% 长石: 65.82% 白云石: 24.52% 方解石: 0.08% 黏土: 0.45%	密度: 2.61 g/cm ³ Pe:3.34

图 9 MY1H 井矿物定量分析结果与岩石分类对比图(1类和2类)

Fig. 9 The comparisons between the results of mineral quantitative analysis and the rock classification of the well MY1H (the rock class 1 and 2)

密度值均在 2.55~2.67 g/cm³ 之间。而 Pe 值也有一定的变化。1类岩石 Pe 值小于3,MY1H-7号样品

取样点位于非均质性较强的位置,横跨几个纹层,因此平均密度和Pe值均高于石英含量较高的5号

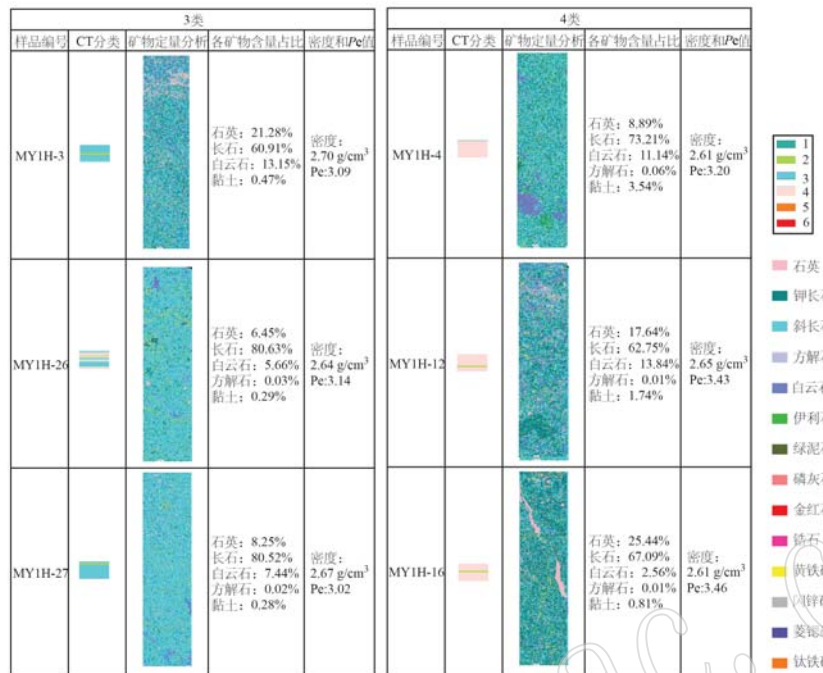


图 10 MY1H 井矿物定量分析结果与岩石分类对比图(3类和4类)

Fig. 10 The comparisons between the results of mineral quantitative analysis and the rock classification of the well MY1H (the rock class 3 and 4)

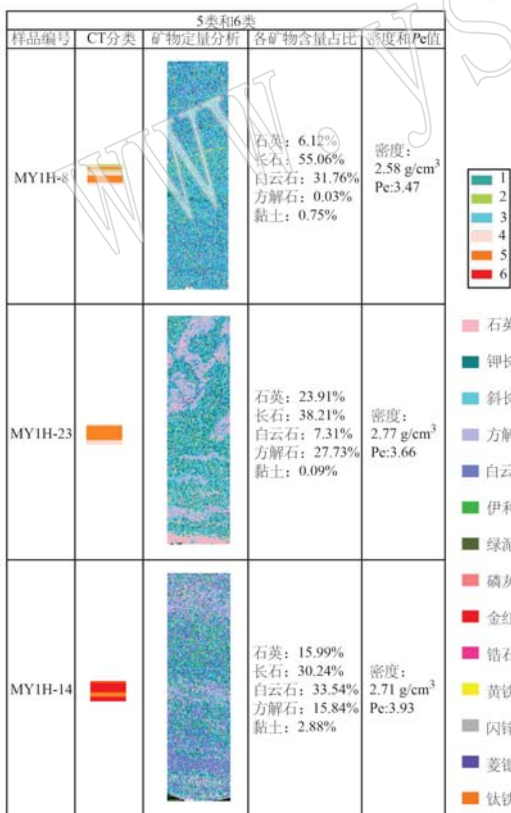


图 11 MY1H 井矿物定量分析结果与岩石分类对比图(5类和6类)

Fig. 11 The comparisons between the results of mineral quantitative analysis and the rock classification of the well MY1H (the rock class 5 and 6)

和 10 号样品。然而,从 CT 分类图中可以看出,石英含量高的条带对应深绿色条带,位于密度和 Pe 值较低区间,具有很好的对应性。2 类样品 Pe 值在 3.2~3.51 之间,3 类样品 Pe 值在 3~3.14 之间,4 类样品 Pe 值在 3.2~3.46,但密度值要高于 2 类,可以用此来进行分类;5 类和 6 类密度值均大于 3.5。

综上所述,通过全直径双能 CT 获取的密度和光电指数 Pe 值能够很好地区分不同矿物,并且 CT 扫描分辨率为 1 mm,因此可以很好地识别和分类大于 1 mm 的纹层内不同的矿物条带。

3.2 考虑宏观非均质性的有代表性取样方法

通常情况下,传统的取样考虑测井资料,同时也考虑现场录井的岩性、荧光特征、含油等特征。但由于测井分辨率没有全直径 CT 高,而且录井人员对岩性等特征只是简单描述,不同人描述存在不同的差异,会影响后期取样人员的判断,而 CT 扫描精度高,可达 0.8 mm,能够识别细纹层及纵向矿物的特征变化,是一个更精细的表征,对于后期工程施工来讲可以根据不同岩性特征进行分段压裂。其优势在于精细化表征,精细化采样,同一类型选取 1~2 块表征即可,避免造成资源浪费 (Avseth *et al.*, 2005; 洪有密, 2008)。

因此,本文提出一种考虑宏观非均质的有代表性取样方法,通过结合全直径双能 CT 分类结果,进

行针对性取样。该方法整体的取样流程是先收集研究井的录井和测井资料,结合该井沉积构造背景,熟悉该井纵向地质分层情况、岩性特征、油气显示以及电性特征等,然后再依据测井解释结果选取主力层段的不同岩石类型,兼顾纵向上的岩性变化,进行代表性样品选取。

图 12 展示了该方法应用于玛湖凹陷页岩类储层的样品选取结果。MY1H 岩心照片显示纵向上岩性变化较大,按照传统均质取样方法会漏失很多岩性变化频繁的层段,而采用结合全直径 CT 扫描结果的方法进行样品选取,可以考虑到纵向上的差异性和代表性,避免不必要的样品测定,有效节约取样成本,同时提高分析精度和准确性。取样结果从岩性上来看涵盖了中-细砂岩、粉砂岩、白云质粉砂岩和粉砂质泥岩,同时也考虑了密度-光电指数的岩石分类结果,确保每种类型的岩石均有取样。通过测井曲线可以看出,所选取的这些样品不仅包含了高 GR

和高电阻率段,还包括了低 GR 值和低电阻率段,为后续进行扫描段纵向非均质性和储层差异性研究提供基础。因此,根据研究需求选择具有代表性的样品可以更好地优化数据分析,提高研究效率和研究质量,避免不必要的浪费,同时可以提高分析的准确性。需要注意的是,全直径双能 CT 扫描方法适用于多种岩石类型,如砂岩、页岩等,但对于一些特殊岩石类型可能存在局限性,因此在验证和推广应用过程中,需要考虑样本的岩石学特征和物性特征,以确定该方法是否适用于特定的岩石类型。除此之外,新方法的适用性和沉积环境等地质条件有关,不同沉积环境可能会形成不同特征的岩石,因此在应用新方法时,需要考虑沉积环境对岩石特征的影响,以确定新方法在不同地质情况下的适用性。

3.3 矿物和甜点段的相关性

“双甜点”在油气地质领域指的是地质甜点与工程甜点。地质甜点是指在地质研究中具有重要意义

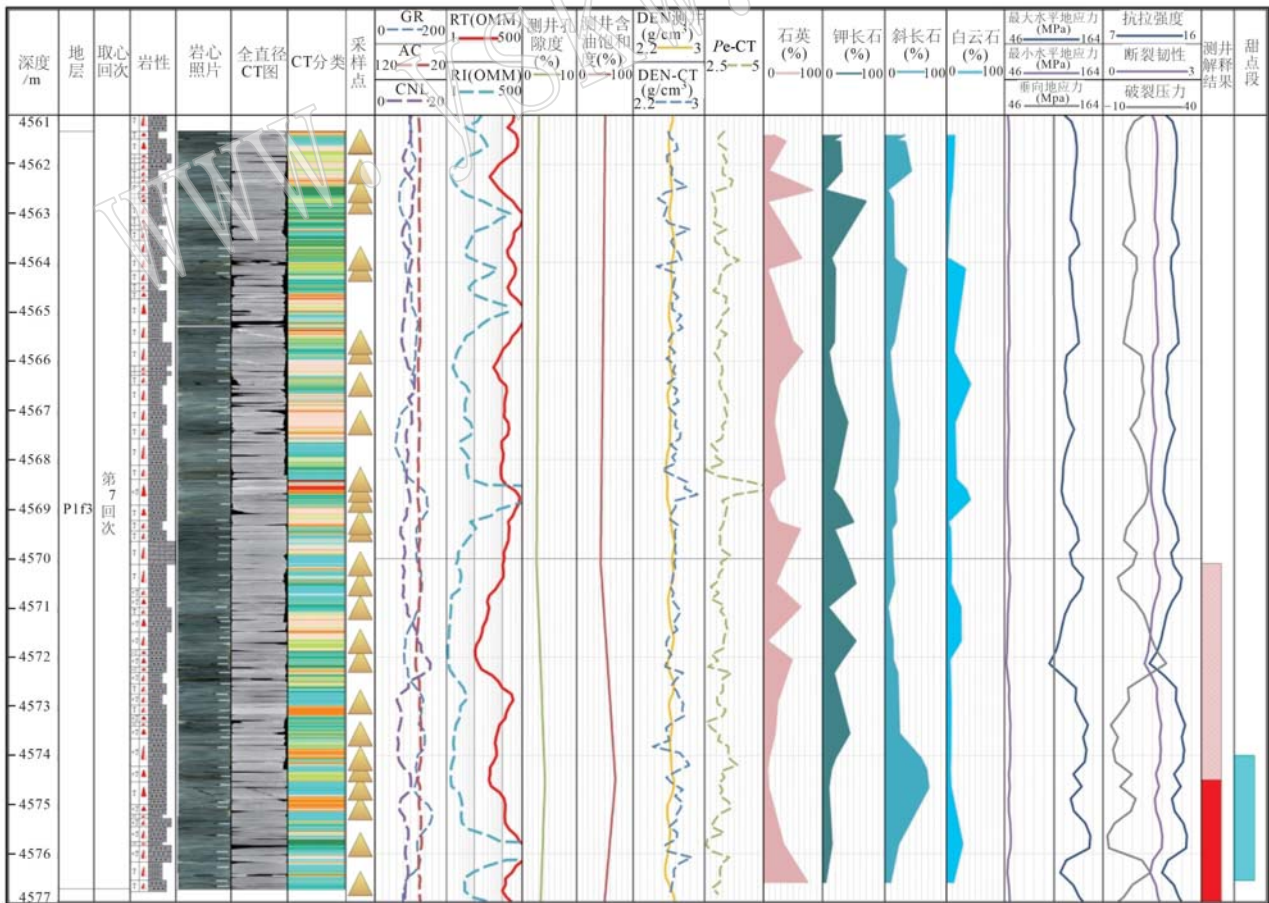


图 12 MY1H 综合解释图

Fig. 12 The comprehensive interpretation diagram of the well MY1H

或者特殊价值的岩石样本,即在该地区有油气藏的富集,包括物性特征、含油气性特征和地球化学特征;而工程甜点是在地质甜点的基础上,在工程建设和开采过程中有重要意义的岩石样本,通常具有较好的工程性质,即该地区的油气藏容易压裂开发,相关参数包括脆性指数、压力系数和裂缝预测等参数(袁余洋等, 2020)。本文提出的岩石分类方法还可

以结合测井解释成果用于优势储层和甜点段的识别。从图12可见,斜长石含量高的层段测井孔隙度和含油饱和度较高,测井解释结果为差油层-油层,同时该段光电指数在3~3.2之间,密度 $2.65 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$,也具有纵横波速较高的特点。

图13绘制了各主要矿物与力学参数对比情况,通过对比钾长石、斜长石、石英以及白云石的抗拉强

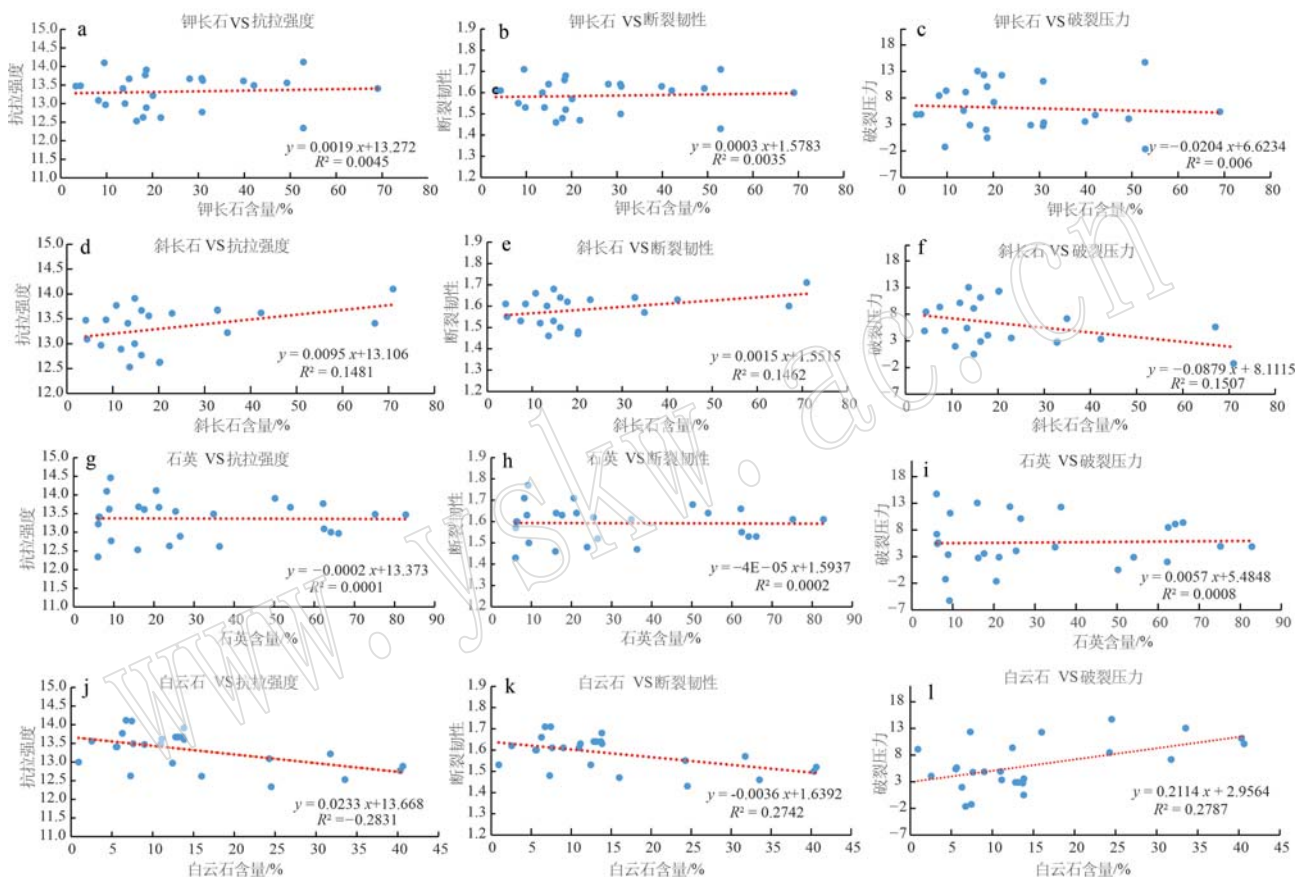


图13 主要矿物含量与力学参数关系图

Fig. 13 Diagrams of the relationship between major minerals content and mechanical parameters

度、断裂韧性以及破裂压力,我们可以看出,4类矿物中,只有斜长石存在这样的一种特性,即斜长石含量同抗拉强度和断裂韧性成正比,与破裂压力成反比。因此,岩石中斜长石含量越高,岩石抗拉能力、脆性及裂缝扩展的能力越强,同时岩石的破裂压力较低,也更容易被压裂。因此,综合测井解释的结果和力学参数,我们可以得出一个结论,斜长石含量高的层段为更优甜点,这个观点也在该井最终水平压裂段生产中得到了验证,如图14,MY1H井测井综合解释图中两条红线间即为该井的甜点段,含油性、物性较好。

另外需要注意的是,使用岩石抗拉强度和破裂压力作为判别甜点的指标并不全面,这些参数只是衡量岩石强度的一部分,结合其他可能的参数或者性质,从而更加全面地评估甜点的特征。

4 结论

采用全直径双能CT扫描技术对岩心进行可视化分析,并定量评价了岩心密度和光电指数。采用聚类分析方法,将岩心分为6类,能有效区分出主要矿物如石英、斜长石、钾长石和白云石。针对不同类

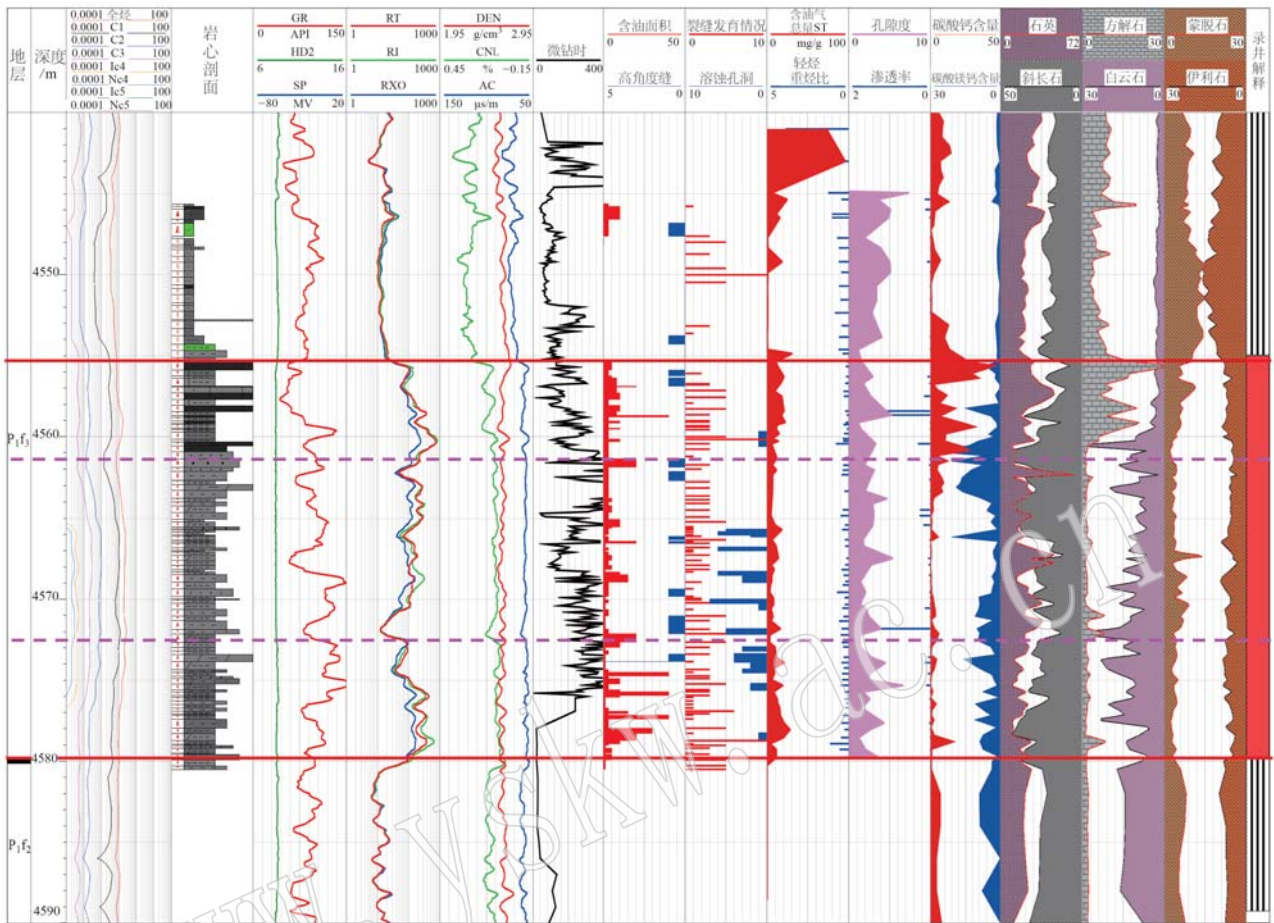


图 14 MY1H 测井综合解释成果图

Fig. 14 Comprehensive interpretation diagram of the well MY1H logging

型样品分别进行取样并进行 MaipSCAN 分析后, 得出 MY1H 风三段页岩油藏是一种典型的粉砂质页岩油储层, 整体岩性以中-细砂岩、粉砂岩、白云质砂岩和粉砂质页岩为主, 部分层段纹层发育, 纵向上岩性变化较大。

本文提出一种新的岩石分类方法, 综合考虑岩石密度和光电指数, 并将其应用于优势储层的识别。通过对密度-光电指数分类结果的分析, 本文发现矿物分布与储层物性和力学性质之间存在较好的一致性, 特别是斜长石含量较高的层段, 其含油性和物性都表现出了较好的特征, 同时岩石抗拉能力、脆性及裂缝扩展的能力强, 岩石的破裂压力较低, 更容易进行压裂改造, 因此, 斜长石含量高的现象可以作为该井地质甜点和工程甜点的标志。

本文还创新提出了考虑宏观非均质性的有代表性样品选取方法和流程, 为选取有代表性的样品提供了依据。该方法最大的优点是结合全直径双能

CT 结果考虑了非均质性, 提高了取样的价值性和代表性, 避免了均匀取样的误差, 提高分析精度和准确性, 同时有效节约取样及实验成本。需要指出的是, 本研究方法也存在一定局限性。例如, 由于无法获取其他文章采用的具体岩心样品, 因此本文的方法没有和传统的岩心-薄片方法在特定储层实例上开展对比研究, 以评估两种方法在储层特征刻画方面的优劣性能。与传统岩心薄片分析方法这一缺憾不仅限制了对比验证分析, 也为后续拓展研究留下了发展空间。因此, 开展岩心样品和分析方法的对比评价工作, 可以作为本研究的重要拓展方向。

References

- Alves H, Lima I, de Assis J T, *et al.* 2015. Mineralogy evaluation and segmentation using dual-energy microtomography [J]. X-Ray Spectrometry, 44(3): 99~104.

- Alves H, Lima I and Lopes R T. 2014. Methodology for attainment of density and effective atomic number through dual energy technique using microtomographic images[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 89: 6~12.
- Avseth P, Mukerji T and Mavko G. 2005. *Quantitative Seismic Interpretation*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, *et al.* 2015. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(7): 781~790 (in Chinese).
- Chang S, Lee H K and Cho G. 2012. Application of a dual-energy monochromatic X-ray CT algorithm to polychromatic X-ray CT: A feasibility study[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 44(1): 61~70.
- Dvorkin J and Nur A. 1996. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets[J]. *Geophysics*, 61(5): 1 363~1 370.
- Grieken R E and Markowicz A A . 1993. *Handbook of X-ray Spectrometry Methods and Techniques*[M]. New York: Marcel Dekker.
- Haghighi R R, Chatterjee S, Vyas A, *et al.* 2011. X-ray attenuation coefficient of mixtures: Inputs for dual-energy CT [J]. *Medical Physics*, 38(10): 5 270~5 279.
- Hong Youmi. 2008. *Logging Principles and Comprehensive Interpretation* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press (in Chinese).
- Jussiani E I and Appoloni C R. 2015. Effective atomic number and density determination of rocks by X-ray microtomography[J]. *Micron*, 70: 1~6.
- Ketcham R A. 2005. Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography[J]. *Journal of Structural Geology*, 27(7): 1 217~1 228.
- Ketcham R A and Carlson W D. 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences [J]. *Computers & Geosciences*, 27(4): 381~400.
- Jussiani E I and Appoloni C R. 2015. Effective atomic number and density determination of rocks by X-ray microtomography[J]. *Micron*, 70: 1~6.
- Lan Yefang, Ren Chuanjian, Huang Yu, *et al.* 2021. The evaluation of shale gas source rocks in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Yanzikou area, northwest Guizhou [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 49~64 (in Chinese with English abstract).
- Landry G, Reniers B, Granton P V, *et al.* 2011. Extracting atomic numbers and electron densities from a dual source dual energy CT scanner: Experiments and a simulation model[J]. *Radiotherapy and Oncology*, 100(3): 375~379.
- Li Mingqian, Wang Miao and Liu Fang. 2023. Improved k-means data clustering method for power grid control automation system[J]. *Machinery & Electronics*, 41(3): 34~38 (in Chinese).
- Li Zhaofeng, Tang Xianglu, Huang Liliang, *et al.* 2021. Lithofacies development characteristics of Fengcheng Formation shale in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *China Energy and Environmental Protection*, (4): 108~114 (in Chinese).
- Liu Deguang, Zhou Lu, Li Shihong, *et al.* 2020. Characteristics of source rocks and hydrocarbon generation models of Fengcheng Formation in Mahu depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(5): 946~955 (in Chinese).
- Meng Ying, Wang Jian, Ma Wanyun, *et al.* 2022. Evaluation of hydrocarbon source rock characteristics of lower Permian Fengcheng formation in Mahu sag based on fine grained sedimentary rock type[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(5): 1 735~1 746(in Chinese with English abstract).
- Pan Songqi, Guo Qiulei, Zou Caineng, *et al.* 2023. Identification of sweet spots in shale-type and siltstone-type “shale oil systems”: A case study of the Chang 7 Member in Ordos Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 66(7): 1 647~1 663 (in Chinese).
- Rodolfo A V. 2017. *Multiscale, Image-Based Interpretation of Well Logs Acquired in a Complex, Deepwater Carbonate Reservoir*[D]. Austin: The University of Texas at Austin.
- Sun Longde, Zhao Wenzhi, Liu He, *et al.* 2023. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 44(1): 1~13 (in Chinese).
- Wang Chengrong, Wu Du, Liu Zhimin, *et al.* 2022. A new method on evaluation of shale oil reservoir with eccentric NMR logging[J]. *Well Logging Technology*, 46(2): 151~157 (in Chinese).
- Wang Hailing and Yang Junjie. 2022. Cluster routing algorithm for wsn based on improved bee colony algorithm and K-means clustering[J]. *Computer Applications and Software*, 39(9): 178~182, 232 (in Chinese).
- Wang Xiaowen, Guan Ping, Liang Xiaowei, *et al.* 2021. Analysis of pore properties of favorable shale oil reservoir of Chang-7 in Ordos Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(3): 459~469 (in Chinese).
- Wellington S L and Vinegar H J. 1987. X-ray computerized tomography [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 39(8): 885~898.
- Xia Wenhe, Tang Yindong, Li Gao, *et al.* 2023. Automatic segmentation

- extraction method for rock debris in sandstone sample images [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(6): 894~906 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yuyang, Liu Yonglin and Wang Ying. 2020. "Sweet spot" effect and mechanism of shale fracture development in Longmaxi Formation, northwestern Guizhou [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 808~818 (in Chinese with English abstract).
- Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, *et al.* 2019. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 615~623 (in Chinese).
- Zhou Xiangzhen, Li Shuai and Sui Dong. 2023. Data driven K-means clustering algorithm optimization based on quantum artificial bee colony [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 47(2): 199~206 (in Chinese).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Dong Dazhong, *et al.* 2022. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China [J]. *Earth Science*, (5): 1 517~1 533 (in Chinese).
- 曹 剑, 雷德文, 李玉文, 等. 2015. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地地下二叠统风城组 [J]. *石油学报*, 36(7): 781~790.
- 洪有密. 2008. *测井原理与综合解释* [M]. 东营: 中国石油大学出版社.
- 兰叶芳, 任传建, 黄 喻, 等. 2021. 黔西北燕子口地区五峰-龙马溪组页岩气源岩评价 [J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 49~64.
- 李明倩, 王 苗, 刘 芳. 2023. 改进 k-means 的电网控制自动化系统数据聚类方法 [J]. *机械与电子*, 41(3): 34~38.
- 李兆丰, 唐相路, 黄立良, 等. 2021. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩岩相发育特征 [J]. *能源与环保*, (4): 108~114.
- 刘得光, 周 路, 李世宏, 等. 2020. 玛湖凹陷风城组烃源岩特征与生烃模式 [J]. *沉积学报*, 38(5): 946~955.
- 孟 颖, 王 剑, 马万云, 等. 2022. 基于细粒岩石类型对玛湖凹陷下二叠统风城组烃源岩分类评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 52(5): 1 735~1 746.
- 潘松圻, 郭秋雷, 邹才能, 等. 2023. 页岩型与粉砂岩型“页岩油系统”甜点段判识——以鄂尔多斯盆地长7段为例 [J]. *中国科学: 地球科学*, 66(7): 1 647~1 663.
- 孙龙德, 赵文智, 刘 合, 等. 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论 [J]. *石油学报*, 44(1): 1~13.
- 王成荣, 吴 都, 刘志敏, 等. 2022. 偏心型核磁共振测井评价页岩油储层新方法 [J]. *测井技术*, 46(2): 151~157.
- 王海玲, 杨俊杰. 2022. 基于改进蜂群算法及K均值聚类的WSN分簇路由算法 [J]. *计算机应用与软件*, 39(9): 178~182, 232.
- 王晓雯, 关 平, 梁晓伟, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地长7段页岩油优质储层特征分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(3): 459~469.
- 夏文鹤, 唐印东, 李 皋, 等. 2023. 砂样图像岩屑自动分割提取方法 [J]. *岩石矿物学杂志*, 42(6): 894~906.
- 袁余洋, 刘永林, 王 瑛. 2020. 黔西北地区龙马溪组页岩有机质和脆性矿物的控缝机制 [J]. *岩石矿物学杂志*, 39(6): 808~818.
- 支东明, 唐 勇, 郑孟林, 等. 2019. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素 [J]. *中国石油勘探*, 24(5): 615~623.
- 周湘贞, 李 帅, 隋 栋. 2023. 数据驱动下基于量子人工蜂群的K均值聚类算法优化 [J]. *南京理工大学学报*, 47(2): 199~206.
- 邹才能, 杨 智, 董大忠, 等. 2022. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望 [J]. *地球科学*, (5): 1 517~1 533.

附中文参考文献