石油与天然气地质
第45卷 第4期 OIL & GAS GEOLOGY 2024年8月

文章编号:0253-9985(2024)04-0954-25 doi:10.11743/ogg20240405

细粒沉积岩测井评价研究进展

庞小娇[1,2],王贵文[1,2],岳大力[1,2],李 栋[2],李红斌[2],王重阳[2],匡立春[1,2],赖 锦[1,2]
[1. 油气资源与工程全国重点实验室 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249]

摘要:细粒沉积岩是致密油气、页岩油气的烃源岩层和储集层,是石油地质研究的重点和前沿领域,测井评价细粒沉积岩在非常规油气勘探开发中具有非常重要的意义。通过系统分析国内外细粒沉积岩测井评价技术进展,研究认为:细粒沉积岩在常规测井基础上结合新技术测井开展了岩性、物性、电性、含油性、可动性、润湿性、脆性、烃源岩特性和地应力各向异性等"七性+"特性评价。进一步发展为细粒沉积岩储集性、含油性、可动性和可压性"新四性"评价方法。依据岩性、岩相、孔隙类型和微观孔隙结构、页理、总孔隙度和有效孔隙度等参数评价细粒沉积岩储集性。根据黏土矿物分布、*TOC*、游离烃含量、含油饱和度、赋存状态及可动油量等参数评价细粒沉积岩含油性。通过成熟度、地层压力、原油密度、原油黏度及气/油比等参数评价细粒沉积岩油可动性。依据黏土矿物成分和含量、脆性矿物成分和含量、杨氏模量、泊松比及最大和最小主应力等参数评价细粒沉积岩可压性。通过成像测井切片技术实现细粒沉积岩米级、毫米级甚至微米级纹层的人工识别与评价。用测井资料开展细粒沉积岩岩相识别与评价。细粒沉积岩测井从常规测井法、新技术测井法向基于数学统计的人工智能法发展。

关键词:甜点分级;测井评价;非常规油气储层;细粒沉积岩
中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

Advances in well log-based assessments of fine-grained sedimentary rocks

PANG Xiaojiao[1,2], WANG Guiwen[1,2], YUE Dali[1,2], LI Dong[2], LI Hongbin[2], WANG Chongyang[2], KUANG Lichun[1,2], LAI Jin[1,2]

[1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
2. *College of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*]

Abstract: Fine-grained sedimentary rocks, which serve as the source rocks and reservoirs of tight/shale oil and gas, are the focus and frontiers of petroleum geology. The log-based assessments of these rocks hold great significance for the exploration and exploitation of unconventional hydrocarbons. In this study, the advances in both domestic and international log-based assessment techniques are systematically analyzed for fine-grained sedimentary rocks. The analytical results indicate that the combination of conventional and emerging logging techniques allows for the assessment of more than seven properties of fine-grained sedimentary rocks, including lithology, physical and electrical properties, oil-bearing capacity, oil mobility, wettability, brittleness, and source rock property. The log-based assessment of fine-grained sedimentary rocks has, therefore, further evolved into the assessment of their reservoir property, oil-bearing capacity, oil mobility, and fracability, collectively known as the "new four properties". Specifically, the reservoir property of these rocks is assessed based on parameters such as lithology, lithofacies, pore type, microscopic pore structure, lamellation, total porosity, and effective porosity. Their oil-bearing capacity is assessed using parameters like clay mineral content, *TOC* content, free hydrocarbon content, oil saturation, oil occurrence, and movable oil content. The oil mobility in fine-grained sedimentary rocks is assessed according to parameters such as maturity, formation pressure, crude oil density and viscosity, and gas/oil ratio. The fracability of these rocks is assessed using parameters like the respective compositions and contents of clay and brittle minerals, Young's modulus, Poisson's ratio, and the maximum and minimum principal stresses. The formation micro-imaging (FMI) logging slicing technology enables the manual identification and assessment of meter-, millimeter-, and even micron-scale laminae in fine-grained sedimentary rocks. Additionally, log data facilitate the identification and assessment of the lithofacies of fine-grained sedimentary

收稿日期:2024-05-29;**修回日期**:2024-07-12。
第一作者简介:庞小娇(1993—),女,博士,沉积学、储层地质学与测井地质学。**E-mail**:15010050518@163.com。
通信作者简介:王贵文(1966—),男,教授、博士研究生导师,沉积学、储层地质学与测井地质学。**E-mail**:wanggw@cup.edu.cn。
基金项目:中石油股份公司重大专项(2021ZZ10-01);中国石油大学(北京)科研基金项目(2462024XKBH009);中国博士后创新人才支持计划项目(BX20240425);中国博士后科学基金面上项目(2024M753611)。

rocks. The techniques and methods for log-based assessments of fine-grained sedimentary rocks are evolving from conventional and emerging logging techniques toward artificial intelligence approaches based on mathematical statistics.

Key words: sweet spot classification, log-based assessment, unconventional hydrocarbon reservoir, fine-grained sedimentary rock

引用格式：庞小娇，王贵文，岳大力，等. 细粒沉积岩测井评价研究进展[J]. 石油与天然气地质，2024，45(4)：954-978. DOI：10. 11743/ogg20240405.

PANG Xiaojiao, WANG Guiwen, YUE Dali, et al. Advances in well log-based assessments of fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 954-978. DOI: 10. 11743/ogg20240405.

细粒沉积岩最早由Krumbein等[1]在岩石粒度分析中提出，是指粒径小于0. 062 5 mm的颗粒含量占50 %以上的沉积岩[2-3]。细粒沉积岩成分主要包括黏土矿物、粉砂、碳酸盐和有机质等[4-5]。通常认为该岩类主要由黏土矿物和粉砂级陆源碎屑组成，也包含少量盆地自生碳酸盐、生物硅质和磷酸盐等颗粒，是沉积岩中最常见、分布最广泛的岩石类型[3-4,6]，形成于地质历史时期的细粒沉积岩占比甚至超过其他种类沉积岩的总和[3]。21世纪以来，随着致密油气和页岩油气勘探开发的深入，细粒沉积岩成为研究的重点和热点[7]。细粒沉积广泛分布于全球各个含油气盆地[5]，如美国和加拿大交界处的Williston盆地巴肯页岩[8]，美国Fort Worth盆地Barnett页岩[9-10]、得克萨斯州南部Eagle Ford页岩[11]，中国四川盆地志留系龙马溪组页岩[12-14]、渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组细粒沉积岩[5,15]、渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段细粒沉积岩[16-17]、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段细粒沉积岩[18-20]、三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩[21-22]、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩[23-25]、准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩[26-27]、松辽盆地白垩系青山口组页岩[28-29]及苏北盆地古近系阜宁组二段页岩[30]等。众多专家学者针对具有源-储一体特征的细粒沉积岩做了积极有益的探讨。在细粒沉积岩的沉积体系[5,18]、层序地层[31-33]、岩相划分[13,23,27,34]、储层孔隙结构特征及成因机理[10,35-39]、古气候响应[39-41]、化学-沉积相分析[42]及测井评价方法[27,43-47]等方面均取得了一系列创新性成果[48-49]。此外，针对与细粒沉积岩相关的致密油气与页岩油气形成条件[38,50]、富集机理[35,38,51-52]、分布规律[18,53-54]以及地球物理表征方法[55-57]等方面，国内外众多专家学者也展开了深入研究，揭示了细粒沉积岩与油气资源的密切关系。

1　细粒沉积岩测井评价重点

针对细粒沉积岩，采用最多的评价手段是利用常规测井结合新技术测井开展“七性+”和“三品质”研究。其中“七性+”包括岩性、物性、电性、含油性、可动性、润湿性、脆性、烃源岩特性和地应力各向异性；“三品质”是指储层品质、烃源岩品质和工程品质[47,56,58-60]。建立了表征岩相、成岩相、孔隙结构、裂缝、储层品质、物性、含油性、可动性、润湿性、脆性、地层压力、滞留烃及有机质丰度等的岩石物理参数的测井解释模型[46-47,55,61-68]。

近年来，针对具有自生自储特质的细粒沉积岩，有学者提出了“新四性”测井评价方法，即储集性、含油性、可动性和可压性[56,69]，具体为：①依据岩性、岩相、孔隙类型和微观孔隙结构、页理、总孔隙度和有效孔隙度等参数，评价细粒沉积岩储集性；②根据黏土矿物分布、总有机碳含量(*TOC*)、游离烃含量、含油饱和度、赋存状态及可动油量等参数，评价细粒沉积岩含油性；③通过成熟度、地层压力、原油密度、原油黏度及气/油比等参数，评价细粒沉积岩油可动性；④依据黏土矿物成分和含量、脆性矿物成分和含量、杨氏模量、泊松比及最大和最小主应力等参数，评价细粒沉积岩可压性。

测井评价为优质储层分布规律研究和地质+工程“双甜点”预测提供了技术支撑，对分析细粒沉积岩中页岩油气和致密油气的富集与分布规律、指导油气高效勘探开发具有理论和实际双重意义。考虑到天文旋回在细粒沉积岩形成过程中至关重要，本文从测井评价在沉积旋回、烃源岩、储集性、含油性、可动性和可压性6个方面研究中的应用开展详细论述，系统梳理了测井评价在细粒沉积岩研究中的进展，揭示了近年来非常规油气测井评价技术的创新与发展。

2　细粒沉积岩地质特征及测井响应

细粒沉积岩在全球广泛分布，包含泥岩、页岩和粉砂岩等多种岩性，约占沉积岩的2/3[4,25,70]。不同国家、不同地区、不同沉积环境形成的细粒沉积岩在岩石组分、沉积构造、孔隙结构、有机质类型、流体类型和赋存状态等方面存在差异。通过野外露头观察和岩心实验分析能够获得不同类型的细粒沉积岩岩石物理信息，

但实验数据有限，只能提供单点的地质特征，岩石物理响应的区别表现为地球物理测井资料上曲线形状和图像的差异，因此，利用测井资料能够提取细粒沉积岩岩石物理属性在纵向上的连续分布特征。

2.1 地质学特征

2.1.1 岩石学特征

岩石学特征是细粒沉积研究的基础，为深入探讨沉积成因和流体赋存机制及储层岩石物理响应机理和优选测井评价方法奠定基础[70-71]。国内外不同细粒沉积岩盆地地层矿物成分差异较大(图1)。中国海相细粒沉积岩以四川盆地五峰组-龙马溪组页岩为典型代表，岩性主要为硅质页岩、钙质页岩和富有机质暗色页岩[72-73]。黏土矿物复杂多样，以高岭石、蒙脱石和伊利石为主，同时包含石英、长石、云母等碎屑和自生矿物[13,52,74]。中国陆相页岩油储层以深湖-半深湖亚相细粒沉积为主，沉积水体规模相对较小，陆源碎屑、碳酸盐以及火山碎屑等频繁交替，同时受古气候和海水等外界因素影响，湖水含盐度变化明显，总体呈现矿物组分多样、黏土矿物含量高、岩性岩相纵向变化快等特点，纵向上表现为暗色泥岩与浅色粉砂岩或碳酸盐岩频繁薄互层，纹层发育[56]。以松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩为例，岩石矿物组分复杂多样，黏土矿物含量

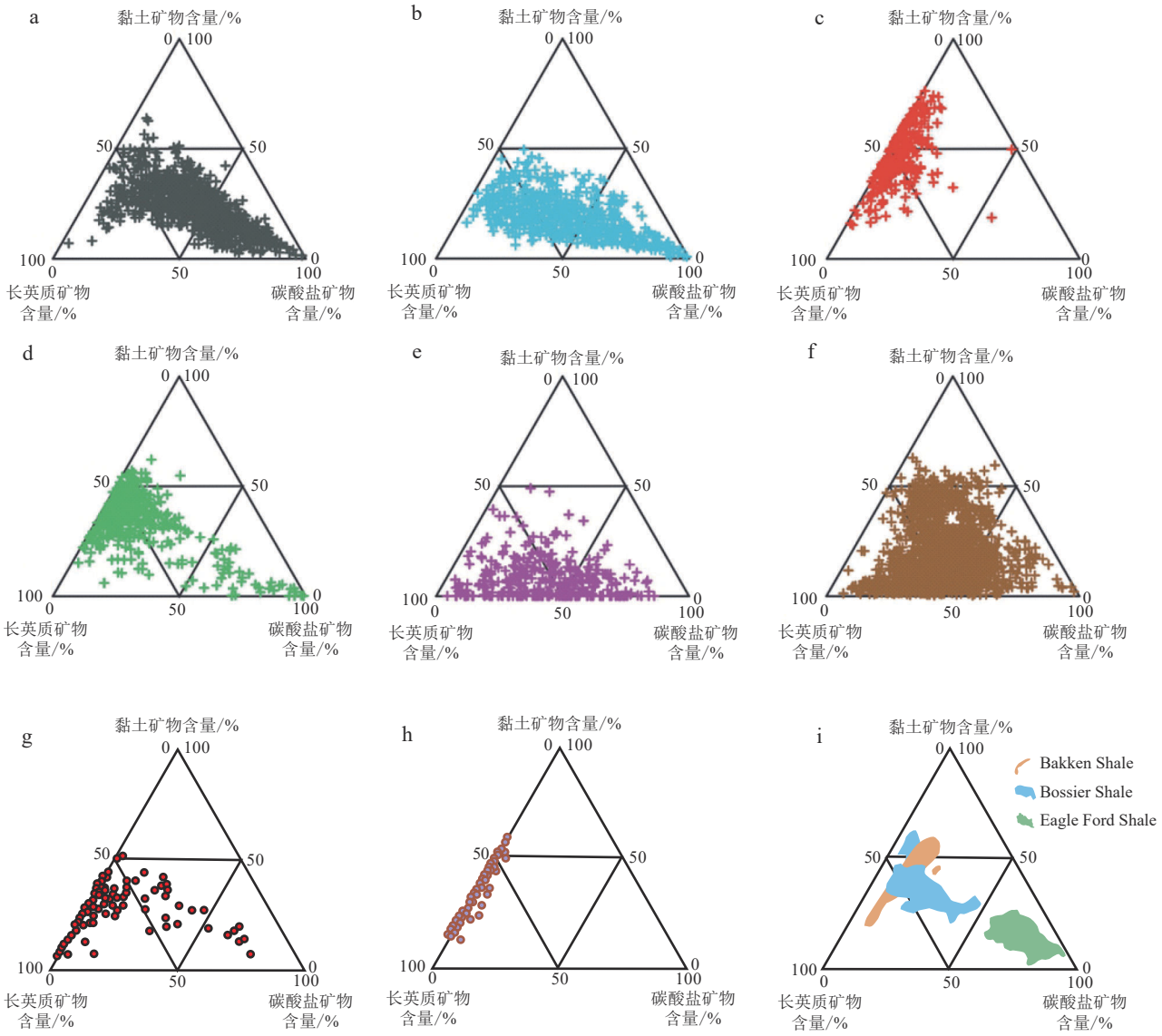

图1 国内外典型盆地细粒沉积岩岩石矿物组成[39,74-76]

Fig. 1 Ternary diagrams showing mineral composition of fine-grained sedimentary rocks in typical basins[39,74-76]

a. 渤海湾盆地沙河街组；b. 渤海湾盆地孔店组；c. 鄂尔多斯盆地延长组；d. 松辽盆地青山口组；e. 准噶尔盆地芦草沟组；f. 准噶尔盆地风城组；g. 四川盆地筇竹寺组；h. 四川盆地龙马溪组；i. 北美海相页岩

较高（最高可达 79 %，平均为 30 %），碳酸盐矿物含量较低，黏土矿物类型以片状伊利石为主[69]。

2.1.2　储集空间类型

受沉积环境、物源、成岩演化和烃源岩成熟度等影响，不同沉积盆地发育的细粒沉积岩储层储集空间类型多样（图 2）。以大型淡水湖盆为背景的细粒沉积岩，当伴生的烃源岩有机质处于低熟-中熟阶段，储集空间主要为石英粒间孔和长石溶蚀孔等无机矿物基质孔；当有机质达到高熟-过熟状态时，孔隙类型以有机质孔和黏土矿物晶间孔为主[35]。在半咸水-咸水湖盆中，储集空间类型主要为碳酸盐矿物晶间孔和溶蚀孔。受天文旋回控制，细粒沉积岩在形成过程中沉积层理显著、纹层发育。纹层界面为岩石力学性质薄弱面，受压实和构造活动影响，在成岩演化过程中易形成层理缝，因此中国陆相页岩除发育较多的微-纳米级孔隙

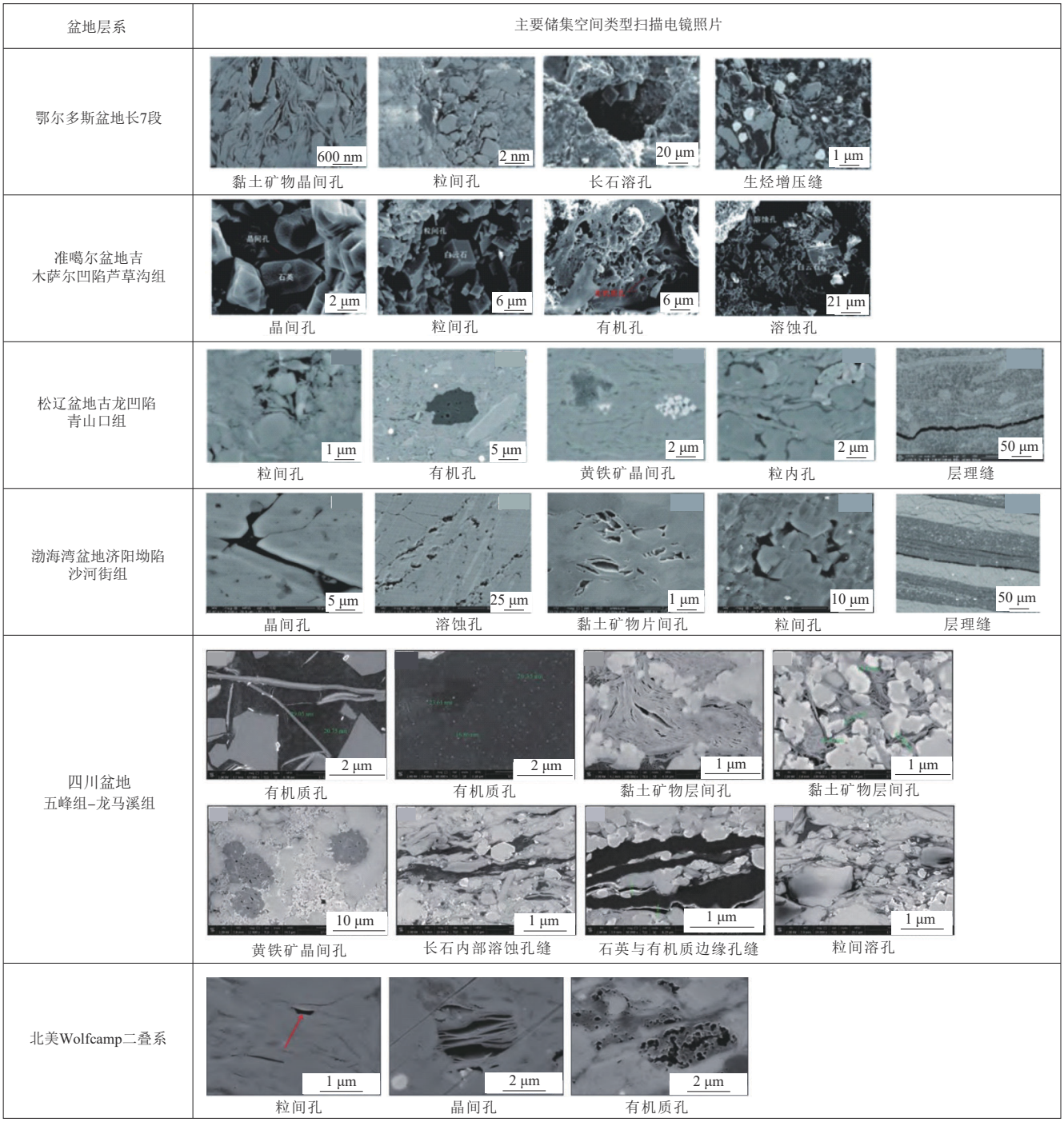

图 2　国内外代表性细粒沉积岩层系主要储集空间类型[34,78-79]

Fig. 2　Major reservoir space types of representative fine-grained sedimentary rock sequences[34,78-79]

外,层理缝和微裂缝亦较为发育。多级次裂缝组合体系既可以形成良好的油气储集空间又可以作为优势运移通道。此外,层理缝和微裂缝的出现能够连通无效、孤立的孔隙,改善孔喉连通性,形成有效的孔-缝网络系统,控制油气的赋存和流动[78]。

2.1.3 沉积旋回与层序地层

细粒沉积岩不仅具有成层性,而且具有旋回性[44]。成层性体现在页岩、泥岩和致密砂岩中纹层特征显著,层状和波状等沉积构造发育。纹层中蕴含着丰富的地质信息,记录了气候变迁、沉积事件、水体性质和古生物等,是湖泊沉积记录的基本单位[37,39,70,81-82]。不同尺度下的纹层所蕴含的主要地质信息不同,小到矿物组分类型、含量、结构、润湿性及矿物间接触关系,大到沉积事件、大气循环、生物爆发或灭绝、古气候、冰期及古地磁[83-85]。旋回性表现为在单一的层体系内,沉积物的结构和成分变化具有方向性和连续性。根据变化特征,将层系划分为以下4种基本类型:正旋回(海/湖进型)、反旋回(海/湖退型)、正反旋回(海/湖进-海/湖退型)、反正旋回(海/湖退-海/湖进型)等。生物标志物、洪泛面、海(湖)侵面、岩相叠置序列和旋回组合的精细识别是构建层序地层格架的关键[86]。岩心精细观察描述、地球化学参数分析和测井资料解释是沉积旋回识别和层序地层划分的重要手段。目前已有的层序地层划分方法包括岩性岩相组合法、矿物成分法、地球化学法、小波分析法、古生物法、天文旋回法、分子地层法、成因控层法以及沉积物粒度+*TOC*+生物扰动强度耦合分析法等[41,87-89]。此外,凝灰岩薄夹层的出现及其ID-TIMS测年分析为层序界面和层序格架的建立提供重要依据[70]。

2.1.4 源-储组合特征

细粒沉积岩源-储配置及其组合关系控制着非常规油气宏观分布[70]。根据烃源岩与油气储集体之间的空间位置关系,将其组合类型划分为3类:源-储一体、源-储叠置和源-储分离[54,90]。源-储一体发育的油气类型主要为页岩油、页岩气和油页岩,具有层系整体富含油气、富含有机质的特征,典型代表为松辽盆地白垩系古龙页岩油、四川盆地奥陶系-志留系页岩气、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段页岩油、渤海湾盆地古近系孔店组和沙河街组页岩油。源-储叠置和源-储分离型则主要富集致密油气,典型代表包括鄂尔多斯盆地三叠系致密砂岩气、准噶尔盆地二叠系芦草沟和风城组致密油[35,73,90-91]。源-储叠置型具有薄砂层或碳酸盐岩层与泥页岩层频繁互层的特点,多源供烃,储集层能够近源捕获上、下邻近源岩层生成的油气形成甜点[35]。

2.2 测井响应特征

不含有机质的细粒沉积岩,自然伽马、电阻率和三孔隙度测井曲线能够较为准确地识别碳酸盐和黏土质等矿物成分的变化。对于富有机质页岩,受其对放射性物质的吸附作用的影响,常规测井曲线难以清楚反映岩石矿物组分的变化,给岩性岩相的准确识别增加了难度。LithoScanner测井能够较为精准地识别岩石矿物组分,高分辨率成像测井除了能够反映沉积构造外,还能依据不同成分电阻率差异协助岩性的识别与表征。细粒沉积岩中,碳酸盐矿物在常规测井上表现为低伽马值、高电阻率和低声波时差,在成像测井上表现为高亮条带状;黏土质矿物在常规测井上的响应特征为高伽马值、低电阻率和低密度,在成像测井上表现为暗色条带状或块状;黏土级或粉砂级的长英质矿物在测井上呈现中等伽马值、中-高电阻率、中-高密度和中等声波时差特征,成像测井上呈现橘色条带状或明暗相间条带状。深湖-半深湖发育的页岩中常伴随黄铁矿、菱铁矿和重晶石等,这些指示沉积环境的矿物在测井曲线亦有所显示,如黄铁矿在常规测井上呈尖刺状低电阻、高密度和低中子孔隙度特征,成像测井上为暗色条带状或团块状。具有源-储一体特征的细粒沉积岩,有机质丰度是沉积岩层油气生成和富集的重要指标,由于碳氢化合物以共价键结合,缺少自由基和可自由移动的电子,因此通常情况下有机质在测井上表现为高伽马值、高电阻率、高中子孔隙度、高声波时差和亮色条带状成像测井模式[74]。

3 细粒沉积岩测井评价技术进展

3.1 沉积旋回测井评价

测井资料具有分辨率高、连续性好的优势,通过声、电、核等反映井周地下地层信息。不同测井数据在不同程度上记录着地质历史演化,从不同侧面反映着地层形成时期的古地理、古气候、古环境和古海/湖平面变化。较大尺度的沉积旋回,如三级及以上的层序利用常规测井曲线(自然伽马、自然电位、电阻率、自然伽马能谱和地层倾角测井)形态、某些自生矿物(如海绿石、黄铁矿、菱铁矿)种类及某些微量元素含量划分不同体系域进行识别[92](图3)。一个完整的体系域包括高位体系域、水进体系域和低位体系域(陆棚边缘体

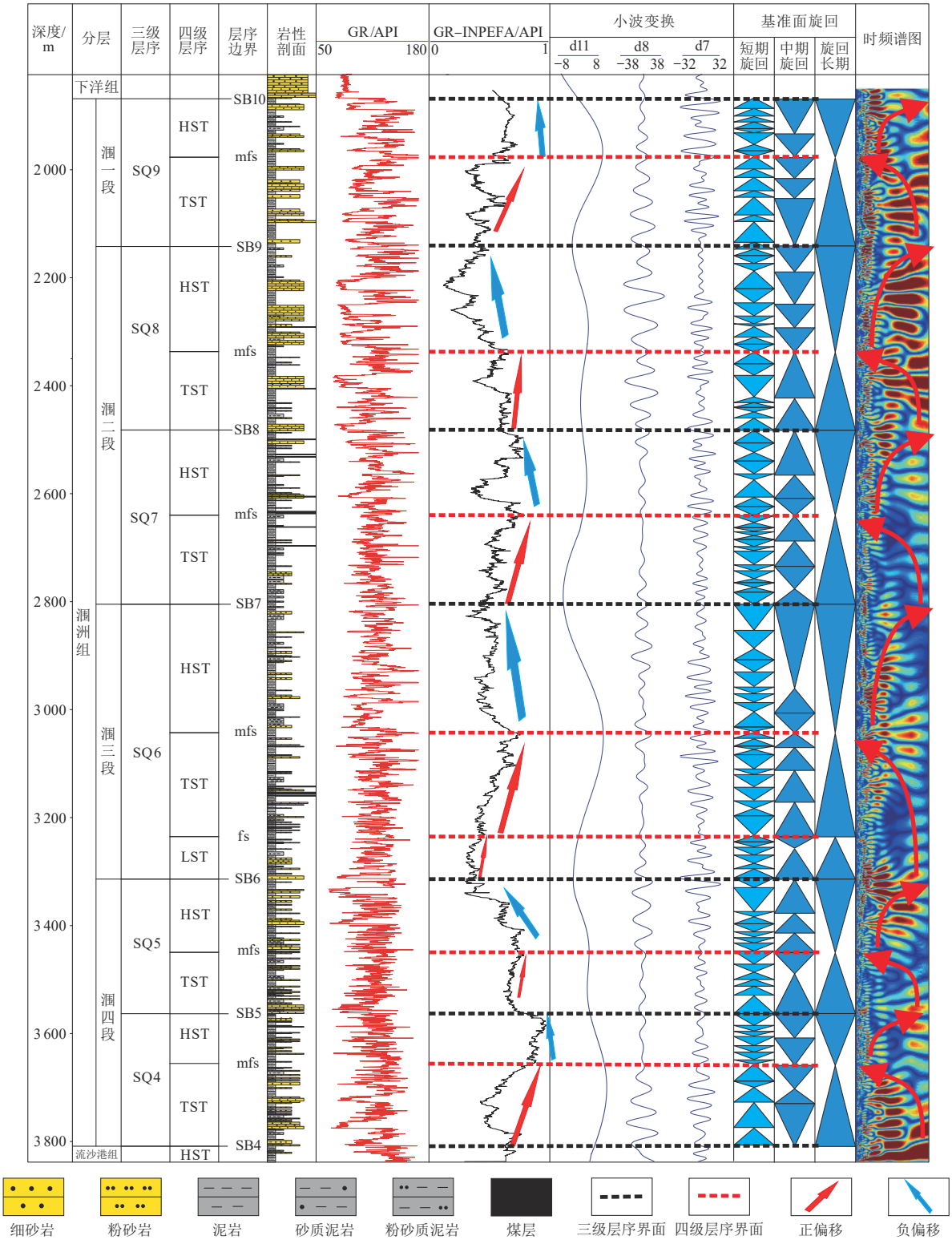

图 3　北部湾盆地海中凹陷海 2 井涠洲组高分辨率层序划分[94]

Fig. 3　High-resolution sequence division of the Weizhou Formation in well Hai 2 in the Haizhong Sag, Beibuwan Basin[94]

HST. 高位体系域；TST. 海侵体系域；LST. 低位体系域；SQ. 层序；SB. 层序界面；mfs. 最大湖泛面；fs. 湖泛面

系域)[93]。

测井曲线时间域(或深度域)频谱亦可反映岩性组合及地层旋回信息。相较于地震资料频谱特征，测井资料分辨率高、频带宽、高频成分多，能够拾取周期更短的高频地层旋回。频域分析的方法多种多样：①傅里叶(Fourier)变换手段在平稳信号整体分析方面

具有优势，对均质性地层沉积旋回分析具有较好的效果。由于细粒沉积岩储层非均质性强、各向异性显著，测井探测到的信号复杂多变，故Fourier方法受限。②INPEFA测井曲线能够识别三级和四级层序，如利用该方法可将涠洲组识别出6个三级层序和13个四级层序。③小波变换能够从复杂的原始测井信号中提取信号时频特征，能够对特定频段和时段的信号进行高质量的时频分析，不同分辨率的时频对应不同级次的沉积旋回，因此能够识别四级、五级甚至六级层序。以长庆油田鄂尔多斯盆地为例，测井数据被分解成1 024，512，256，128和64个尺度大小时，时频特征反映的分别是三级层序、三级层序、准层序组、准层序和岩层组（小层）[94]。GR曲线通过小波变换可以与米兰科维奇旋回联系起来，建立浮动天文年代标尺地层进行精细定年，从而提高地层分辨率[94-95]。

3.2 烃源岩测井评价

烃源岩有机地球化学特征研究是通过实验分析获取采样点的有机质信息，主要包括有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度等，但取心资料有限且成本昂贵[55,96]。地球物理测井资料具有纵向分辨率高、连续性好的优势，既可获得单井纵向连续分布，亦可通过连井对比剖面获得横向展布信息。烃源岩与岩石骨架在岩石物理响应上具有明显的差异，且烃源岩中赋存的烃类流体也会造成测井曲线组合特征差异，这些都是利用测井资料识别与评价烃源岩的基础[63,97]。富有机质烃源岩在测井上整体表现为“四高一低”的特征，即高伽马值、高声波时差、高电阻率、高中子孔隙度和低密度[55,98]。对烃源岩较为敏感的测井系列包括自然伽马测井、自然伽马能谱测井、三孔隙度测井、电阻率测井、碳/氧比测井以及阵列声波测井等。值得注意的是，利用自然伽马测井和自然伽马能谱测井进行判别时，部分湖相泥岩或煤系烃源岩层由于无法吸附到足够的U元素，其伽马值并非最高；利用密度测井时，要排除井壁垮塌或黄铁矿等重矿物富集导致密度异常的影响；利用声波时差测井时，要考虑压实作用、含气性和裂缝的影响；采用中子孔隙度测井时，含气层的气体挖掘效应会造成低中子孔隙度[99-100]。

游离烃含量可以较为直观地反映地层中页岩油的含量，游离烃含量与*TOC*成正相关，可以根据*TOC*评价页岩中油气的富集程度[55]，因此*TOC*的准确计算成为评价的重点。众多学者建立了以*TOC*为主的烃源岩品质测井评价方法，从评价技术和手段方面将方法归纳为3大类：常规测井法、新技术测井法和基于数学统计的人工智能法。受区域限制、地层特征、页岩本身岩石物理响应机理差异和技术成本影响，不同*TOC*计算模型均具有一定的局限性（图4；表1）。常规测井法具有资料易于获取、简便易行的优势，但解释方法受区域、层位及岩性影响；新技术测井法高分辨率测井仪器提高了解释精度，能够考虑到储层的非均质性，更适用于复杂的细粒沉积岩储层，其不足在于成本高、推广难；基于数理统计的人工智能法具有简便易行、易于推广的特征，但需要有大量的样本数据作为支撑才能保证效果。

3.3 岩相测井评价

3.3.1 多尺度纹层结构测井评价

目前，主要利用成像测井切片通过观察统计纹层数量并计算纹层密度，该方法最高精度可达毫米级，实现米级、毫米级甚至微米级纹层的人工识别与评价（图5）。相较于霍夫变换和成层性分析技术，成像测井切片对于纹层的评价具有更为精确的优势，但结果受人为观察影响且工作量大[29,56,101]。如何通过新技术测井（如成像测井、LithoScanner测井、二维核磁测井）提取的岩石物理属性响应参数进一步提高纹层识别的精度和速度，仍需进行深入研究。传统测井解释均是基于地质模式和经验建立线性关系与非线性进行解释与评价，然而针对强非均质性地层和复杂岩性（如页岩），简单的线性关系难以适应，且人为经验性过多导致多解性增强。机器学习手段能够充分发挥测井数据的海量性优势、深度学习算法的高维空间特性以及计算机的高GPU/CPU性能。因此，亟需开展基于机器学习算法的人工智能纹层测井评价[56,102]。

3.3.2 岩相测井评价

细粒沉积岩的概念涵盖了粉砂级和泥级2个不同的粒度等级，且凝灰质等火山碎屑特殊成分及成岩改造作用为细粒沉积岩岩相的分类和命名带来了困难。受天文周期旋回、湖平面升降以及源-汇体系的影响，细粒沉积岩在沉积过程中形成大量纹层、页理和层理等构造。成分特征和沉积构造的差异是造成油气差异富集的根本，是影响非常规油气的开采、水平井部署和压裂改造成效的关键。因此，岩相的精细识别与评价至关重要。目前，主流的划分方案为三端元四组分-沉积构造-有机质含量三级指标[59]。

利用测井资料对细粒沉积岩岩相进行识别与评价时，元素测井（ECS）和岩性扫描测井（LithoScanner）能

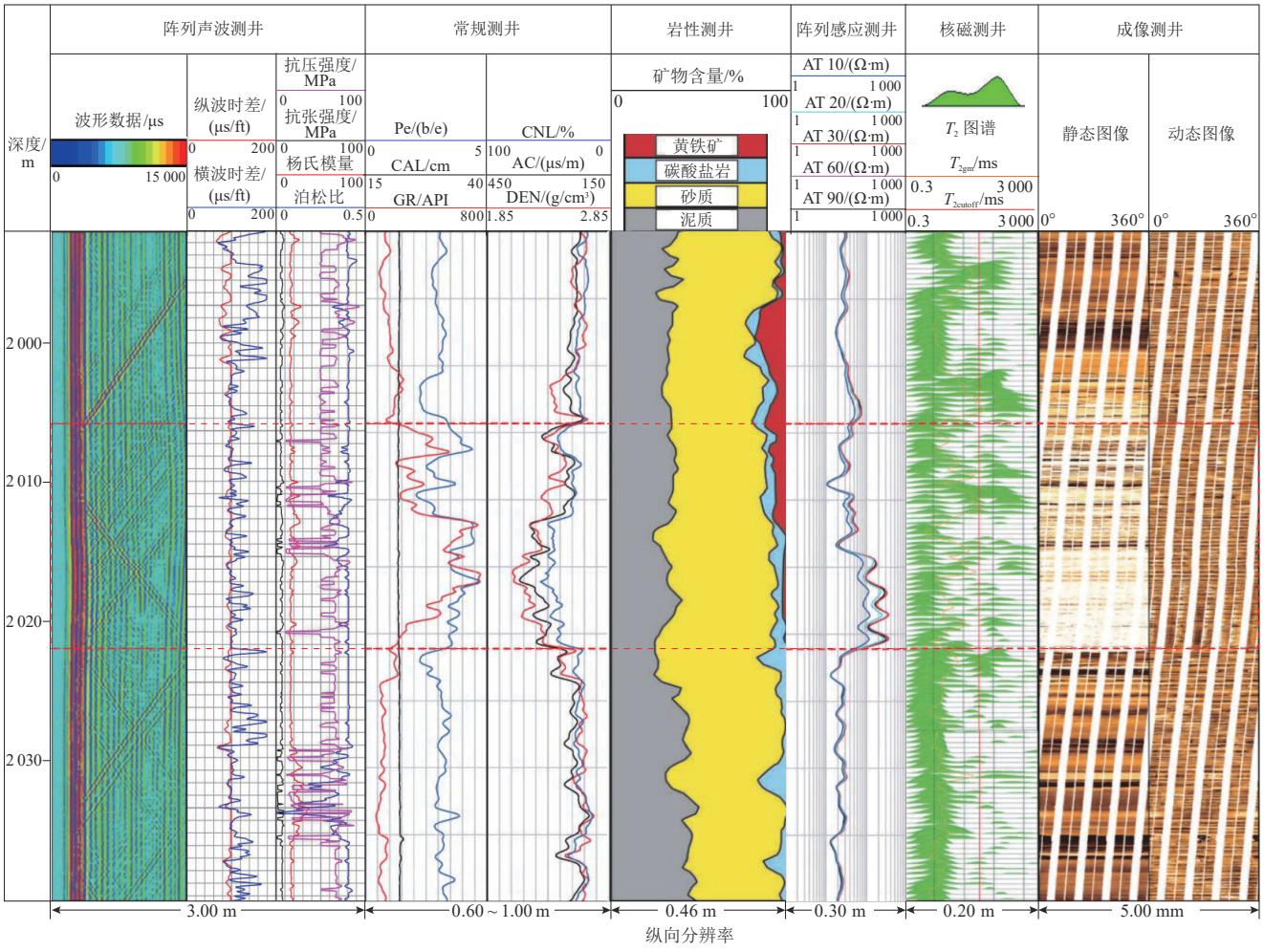

图4　烃源岩在测井上的响应特征及 *TOC* 评价方法优缺点

Fig. 4　Log responses of source rocks and the pros and cons of methods for *TOC* content assessment

（图中的红色虚线为烃源岩层段。）

够提供连续矿物组分，高分辨率成像测井通过提取的切片、纽扣电极电导率曲线和二值化图像等计算纹层密度指数，进而实现单井沉积构造纵向连续识别与精细刻画[29,56]，*TOC* 的计算在 3.2 节中做了详细论述。最后将三者耦合获得测井岩相类型。根据实际岩心和镜下观察到的岩相类别对耦合得到的测井岩相类型进行精简，一方面保证地质识别和测井表征一致，另一方面便于后续岩相组合分类与表征以及平面和剖面分布规律预测。针对未开展新技术测井的井，可以通过提取敏感测井系列并采用人工智能的方法进行岩相的划分和识别[103]（图6）。

3.4　物性测井评价

有效孔隙度是储层质量评价、储量计算和开发方案设计过程中非常重要的一个参数。黏土矿物含量高是页岩的一个典型特征，不同类型的黏土矿物，如伊利石、伊/蒙混层和蒙脱石，受其搭桥等产状的影响，会导致储层孔隙结构复杂、流体赋存状态多变；细粒沉积岩储层受沉积演化和成岩压实作用影响，其孔隙结构和流体分布亦较为复杂，增加了孔隙度和含油饱和度的计算难度。利用常规测井回归拟合或 Archie 公式计算有效孔隙度的结果难以满足精度要求。

对于细粒沉积岩来说，目前多采用核磁共振测井计算储层物性参数。通过选取有效孔的 T_2 截止值（$T_{2cutoff}$），采用迭代法计算孔隙度：①定 T_2 截止值法。通过实验测量数据标定，目的层段给定一个具体值（图7）。②变 T_2 截止值法。根据实验数据分层段选取不同的 $T_{2cutoff}$ 值或引入泥质含量和 T_2 几何均值等参数，建立 $T_{2cutoff}$ 计算公式［公式(1)—公式(3)］。T_2 谱为孔隙结构和流体的综合响应，因此在利用核磁测井进行物性评价时要考虑油气的影响。针对缺少核磁共振测井但有元素测井或岩性扫描测井资料的井，可以通过

表1 *TOC*测井评价方法优缺点

Table 1 The pros and cons of *TOC* logging evaluation

测井序列	方法	优点	缺点
常规测井	①自然伽马能谱测井计算*TOC*经验模型	简便易行	不适用于富含磷的地层
	②Schmoker模型：基于烃源岩层段与非烃源岩层段GR曲线差异	简便易行	不适用于泥质条带和眼球眼皮构造发育的地层
	③Δlg*R*法：声波时差和电阻率测井计算*TOC*	简便易行	碳酸盐含量高的层段识别效果差
	④变基线Δlg*R*法：不同层段选取不同的电阻率基线计算*TOC*	精度较Δlg*R*法有所提高	推广性差
	⑤改进的Δlg*R*法：将Δlg*R*法计算公式中的测井曲线用更敏感的曲线替换	计算精度提高，针对性强	区域局限性
	⑥密度、声波时差和伽马值计算*TOC*：密度和声波时差构建反映黏土矿物含量的指标I_{cl}，根据指标与伽马曲线叠合度计算*TOC*	常规曲线容易获得	不适用于碳酸盐含量高的层段
	⑦多元回归法：利用两种或更多种常规曲线构建*TOC*计算模型，如伽马曲线和三孔隙度曲线	简便	区域局限性
新技术测井	① 基于骨架密度和无机骨架密度差异计算*TOC*	计算精度高，考虑页岩强非均质性特征	成本高，需要深度校正，推广性差
	②核磁孔隙度与密度孔隙度差异模型和多矿物反演模型计算*TOC*		
	③利用密度、纵波速度和横波速度构建*TOC*计算模型		
	④利用密度测井与核磁测井测算的孔隙度差及其与干酪根关系建立*TOC*计算方法		
	⑤干酪根体积分数与*TOC*转换经验公式		
	⑥利用弹性参数与干酪根之间的关系构建*TOC*计算模型		
数学统计/机器学习	①集成极限学习器预测*TOC*	简便易行，易于推广	需要大量数据样本，样本少时效果不佳
	②机器学习算法构建*TOC*计算模型，包括：主成分分析作为支持向量机的输入参数建立*TOC*计算模型、决策树模型计算*TOC*、随机森林算法及XGBoost算法等		

精准计算矿物含量，结合中子和密度测井，采用威利公式的变骨架孔隙度模型计算孔隙度。

$$PE = \sum_{T_{2\text{cutoff}}}^{3000} MBP \times 100\% \tag{1}$$

$$T_{2\text{cutoff变}} = 0.712T_{2\text{gm}} - 1.460V_{\text{clay}} + 0.511^{[57]} \tag{2}$$

$$V_{\text{clay}} = \frac{GR - 75}{GR} \tag{3}$$

式中：*PE*为有效孔隙度，%；*MBP*为孔隙度，v/v；$T_{2\text{cutoff}}$为T_2截止值，ms，分别取2 ms，3 ms，4 ms和$T_{2\text{cutoff变}}$；$T_{2\text{cutoff变}}$为变化的T_2截止值取值，ms；$T_{2\text{gm}}$为T_2几何平均值，ms；V_{clay}为黏土矿物含量，v/v；*GR*为伽马测井值，API。

从评价技术/手段的角度将细粒沉积岩渗透率测井评价方法归纳为以下4种：①孔隙结构法。利用核磁T_2谱转换为压汞曲线及相应参数，通过渗透率与压汞参数之间的关系计算渗透率，该方法对于T_2谱与压汞曲线转换精度要求较高。②改进的Timur/Coates模型。根据不同研究对象类型具体特征对公式中的某个参数加以优化，如考虑到了不同区间孔径对渗透率的贡献，将核磁T_2谱分为多个组分区间。该方法在孔径分区时容易受人为主观因素影响。③原始回波串法。通过对核磁测井原始测量的回波串数据隐含的信息进行深入挖掘和加工，建立渗透率计算模型。该方法规避了T_2谱法在核磁反演过程中产生的误差，但是对于干扰信号的处理要求较高。④斯通利波法。建立斯通利波衰减幅度与渗透率之间的关系模型，该方法对实验和井下斯通利波信号测量精度要求较高[61,104]。

3.5 含油性测井评价

经典的Archie公式[公式(4)]通常适用于中-高孔渗、粒间孔发育、孔喉连通性较好的纯砂岩储层，在细粒沉积岩中适用性差。针对不同类型非常规油气储层，众多学者提出了多种扩展模型，包括考虑泥质含量的W-S模型和S-B模型；同时考虑泥质含量和分布的

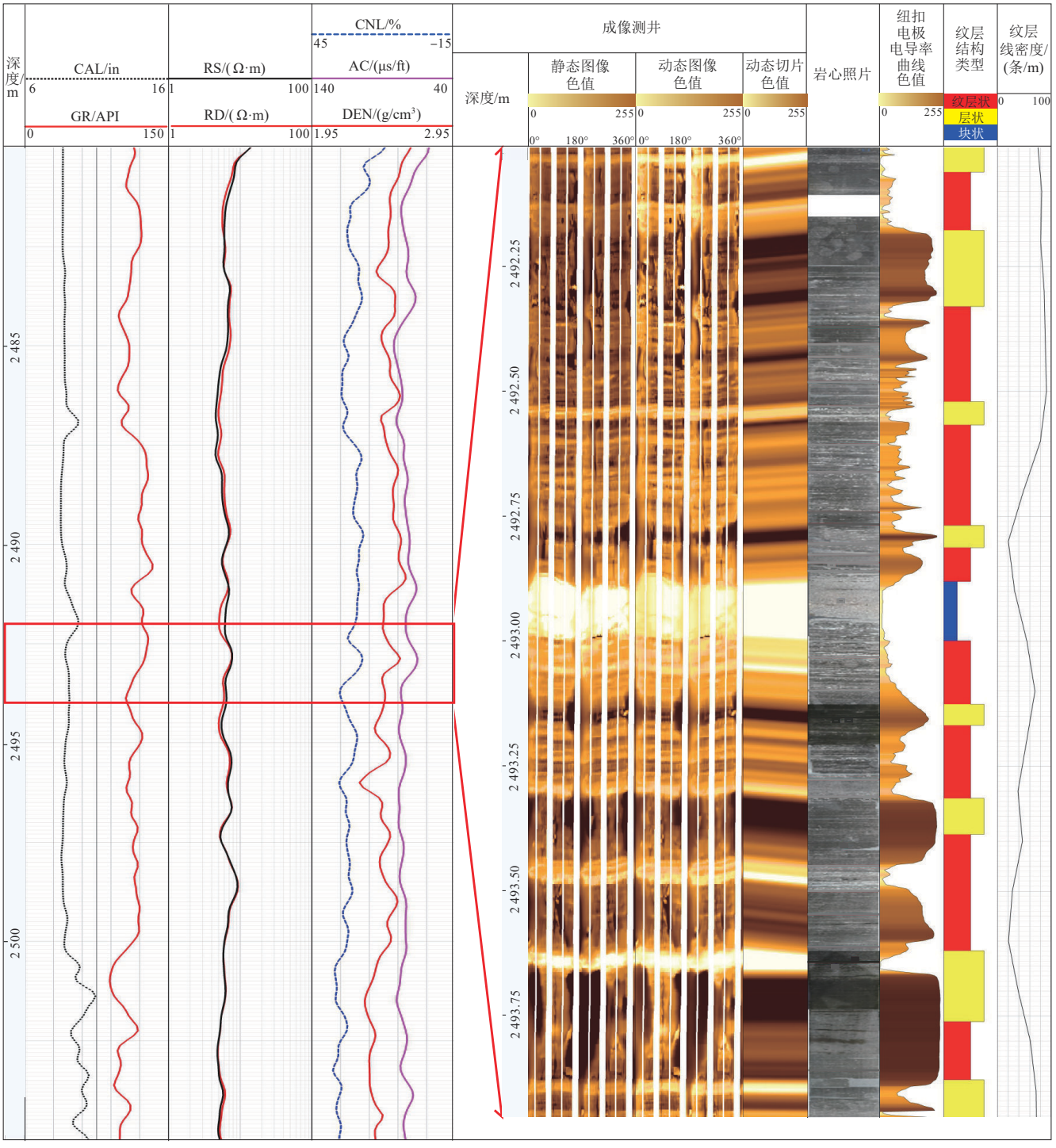

图 5　细粒沉积岩纹层结构测井评价

Fig. 5　Log-based assessment results of laminae in fine-grained sedimentary rocks

阳离子导电饱和度模型包括等效岩石组分模型、“双水”模型、“三水”模型、“双孔”模型、CRMM 模型以及 Aguilera 模型[64-65]。在此基础上提出了经典的西门度公式、印度尼西亚公式和尼日利亚公式等[公式(5)—公式(7)]。基于复杂孔隙结构建立的改进的饱和度模型能够针对不同类型细粒沉积岩储层自身特性调整参数，计算精度较高，但区域局限性强、推广性差，且需要大量的实验数据确定各参数值。通过实验刻度核磁测井来确定含油孔隙对应的 T_2 值进而计算含油饱和度[图 8a；公式(8)]是目前较为常用的方法，该方法不受地层复杂因素影响，简便、快速、直接且能进行单井纵向连续评价(图 9)。此外，通过计算地层中各流体类型含量也可得出含油饱和度[公式(9)]。值得注意的是，当地层中富含铁、锰等顺磁性矿物时需要对核磁计

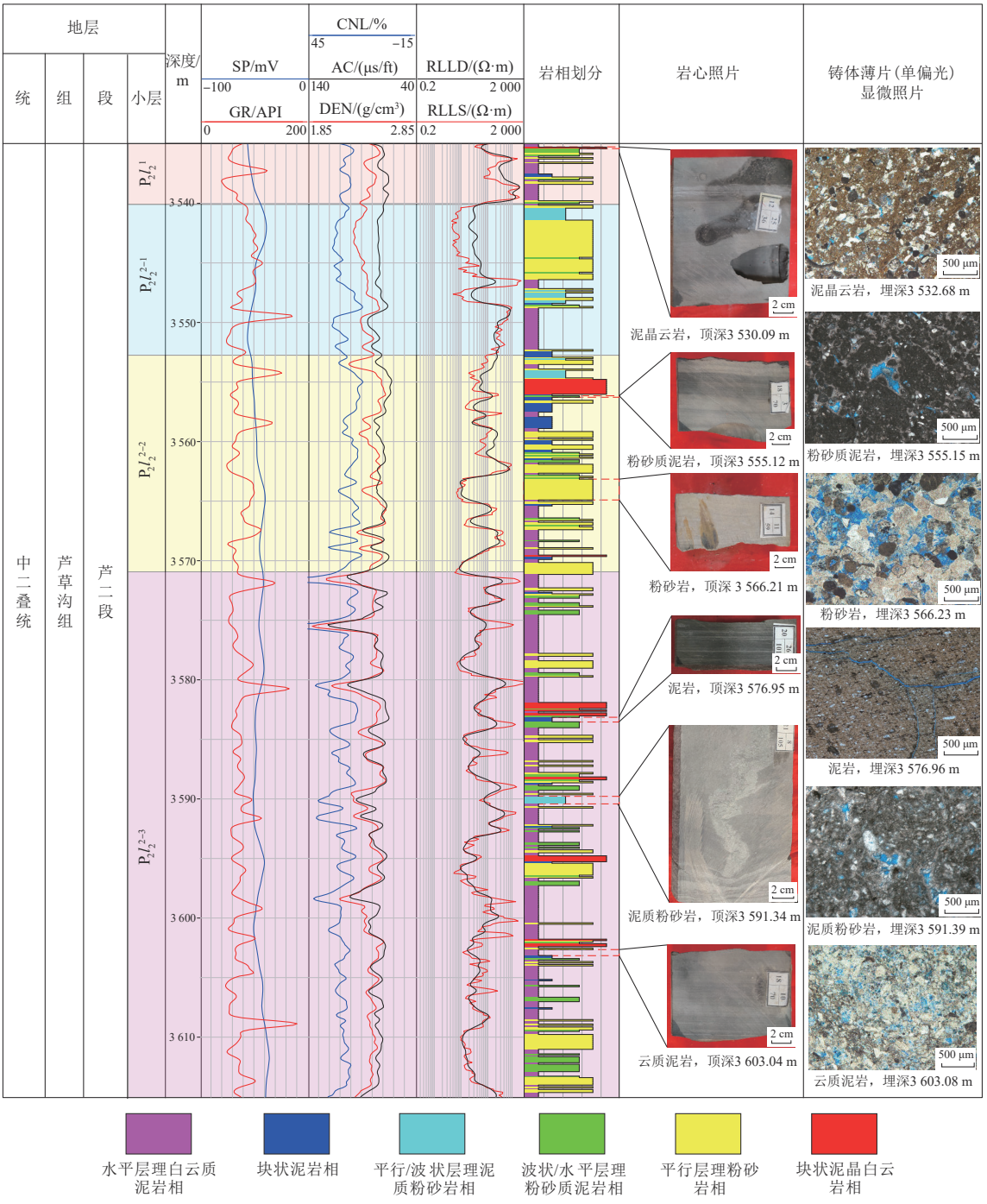

图6 基于Kohonen神经网络的准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密砂岩岩相划分[102]

Fig. 6 Lithofacies division of tight sandstones in the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag within the Junggar Basin based on Kohonen neural network[102]

算结果进行校正[60,106]。对于细粒沉积岩等复杂油气储层，一维和二维核磁测井成为物性和含油性评价主要手段，未来需进一步改善原始数据信/噪比、提高反演稳定性和精度。

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{abR_w}{\Phi^m R_t}} \tag{4}$$

式中：S_w为含水饱和度，%；n为饱和度指数，无量纲；a为岩性系数，无量纲；b为Archie常数，无量纲；R_w为地层水电阻率，Ω·m；Φ为孔隙度，%；m为胶结指数，无量纲；R_t为原状地层电阻率，Ω·m。

西门度(Simendoux)公式：

$$S_w = \left(\sqrt{\left(\frac{V_{sh}}{R_{sh}}\right)^2 + \frac{4\Phi^m}{aR_w(1-V_{sh})R_t}} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}}\right)\frac{aR_w(1-V_{sh})}{2\Phi^m} \tag{5}$$

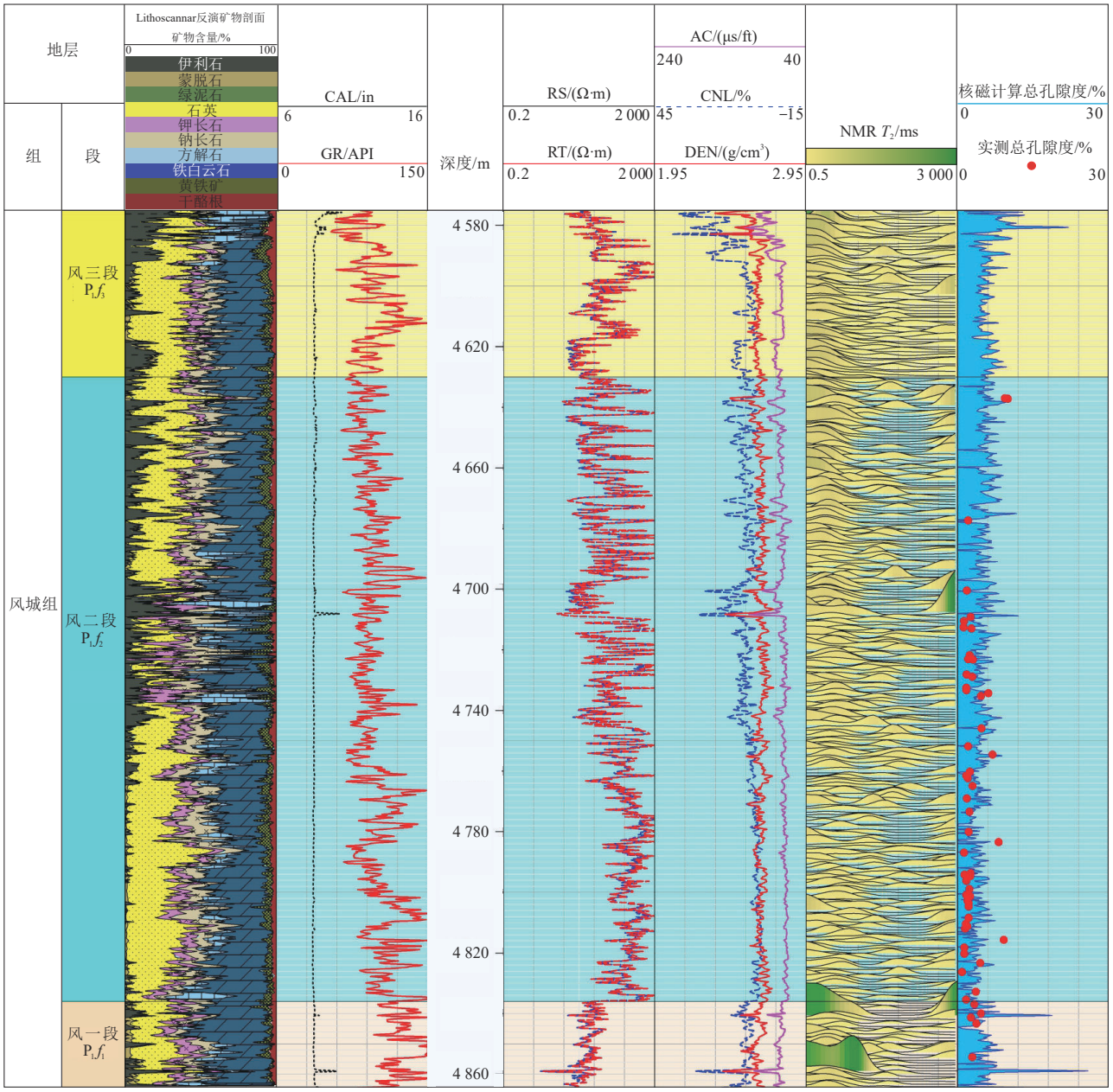

图 7　准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩核磁测井总孔隙度计算（玛页 1 井）[104]

Fig. 7　Nuclear magnetic resonance (NMR) log-derived total porosity of shales in the Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin (well Maye 1) [104]

印度尼西亚公式：

$$S_w = \sqrt{\frac{1}{R_t\left(\frac{V_{sh}^{1-\frac{V_{sh}}{2}}}{R_{sh}} + \frac{\Phi}{\sqrt{aR_w}}\right)^2}} \tag{6}$$

尼日利亚（Nigeria）公式：

$$S_w = \sqrt{\frac{1}{R_t\left(\frac{1}{V_{sh}\sqrt{R_{sh}}} + \frac{\Phi}{\sqrt{aR_w}}\right)^2}} \tag{7}$$

式中：V_{sh}为泥质含量，v/v；R_{sh}为泥岩层段地层电阻率，Ω·m。

$$S_o = \frac{\sum_{T_{2o-cutoff}}^{3000} MBP \times 100\,\%}{\Phi_t} \times 100\,\% \tag{8}$$

式中：S_o为含油饱和度，%；$T_{2o-cutoff}$为含油孔隙对应的T_2截止值，ms；Φ_t为总孔隙度，%。

$$S_o = \frac{V_{om} + V_{oi}}{V_{om} + V_{oi} + V_{wm} + V_{wi}} \tag{9}$$

式中：V_{om}为可动油体积，cm³；V_{oi}为束缚油体积，cm³；V_{wm}为可动水体积，cm³；V_{wi}为束缚水体积，cm³。

3.6　可动性测井评价

细粒沉积岩可形成不同类型的非常规油气储集

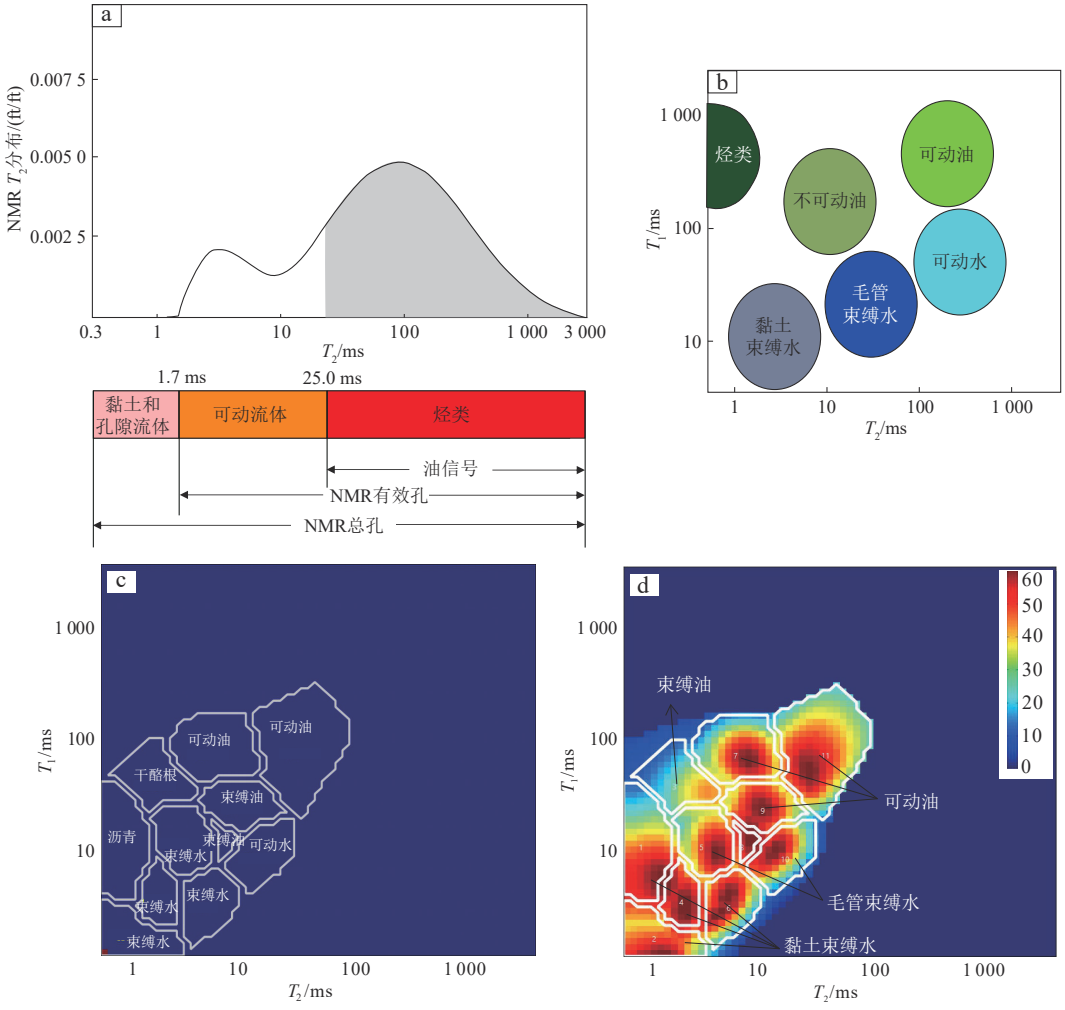

图8 细粒沉积岩含油性和可动性核磁测井评价

Fig. 8 NMR log-based methods for assessing the oil-bearing capacity and oil mobility of fine-grained sedimentary rocks

a. 一维核磁测井评价物性和含油性原理;b. 二维核磁测井流体解释T_1-T_2原理; c. 核磁测井流体T_1-T_2解释过程图;d. 核磁测井流体解释成果图,色值为弛豫时间信号强弱相对值,无量纲

层,其中所赋存的流体类型存在较大差异[106]。流体类型的精准识别和含量的准确计算对于非常规油气储层甜点的选取和水平井压裂的部署具有重要意义。通过渗透率与原油黏度计算原油流度,从而实现可流动性评价,该方法对渗透率和黏度计算精度要求较高,而细粒沉积岩储层受演化程度、沉积环境和气候变迁影响,沉积结构复杂、水平和垂直渗透率差异巨大、原油性质多变,目前尚未建立成熟的渗透率和黏度测井评价模型[106]。用实验数据刻度一维核磁测井,通过确定T_2截止值计算可动油饱和度是目前较为常用且相对准确的一种评价致密/页岩油可动性方法[47,57,64,107](图10)。为了进一步提高解释精度,有学者在此基础上提出变截止值饱和度计算方法,但该方法快速推广难且扩展性较差[59]。斯伦贝谢开发的高精度核磁共振测井仪CMR-MagniPHI(CMR-NG),T_1和T_2的连续测量增强了微小孔隙流体的识别能力。依据不同流体等在T_2和T_1/T_2上的差异响应,利用T_1-T_2图有效区分细粒沉积岩储层流体类型并计算相应饱和度(图8b—d)。随着加载磁场强度增大,不同流体区分精度提高,但识别精度和计算的准确性受岩石固有属性和测量仪器影响。该方法是目前针对强非均质性和强各向异性的细粒沉积储层开展含油性和可动性的最佳手段,由于其成本较高,对于未测量的井采用常规回归拟合方法进行计算,通过有核磁的井进行校正。

3.7 可压性测井评价

可压性评价的内容包括脆性、断裂韧性、地应力大小和方向以及两向应力差。

脆性计算的方法分为矿物分析法和岩石力学分析法。矿物分析是通过计算脆性矿物在所有岩石矿物组

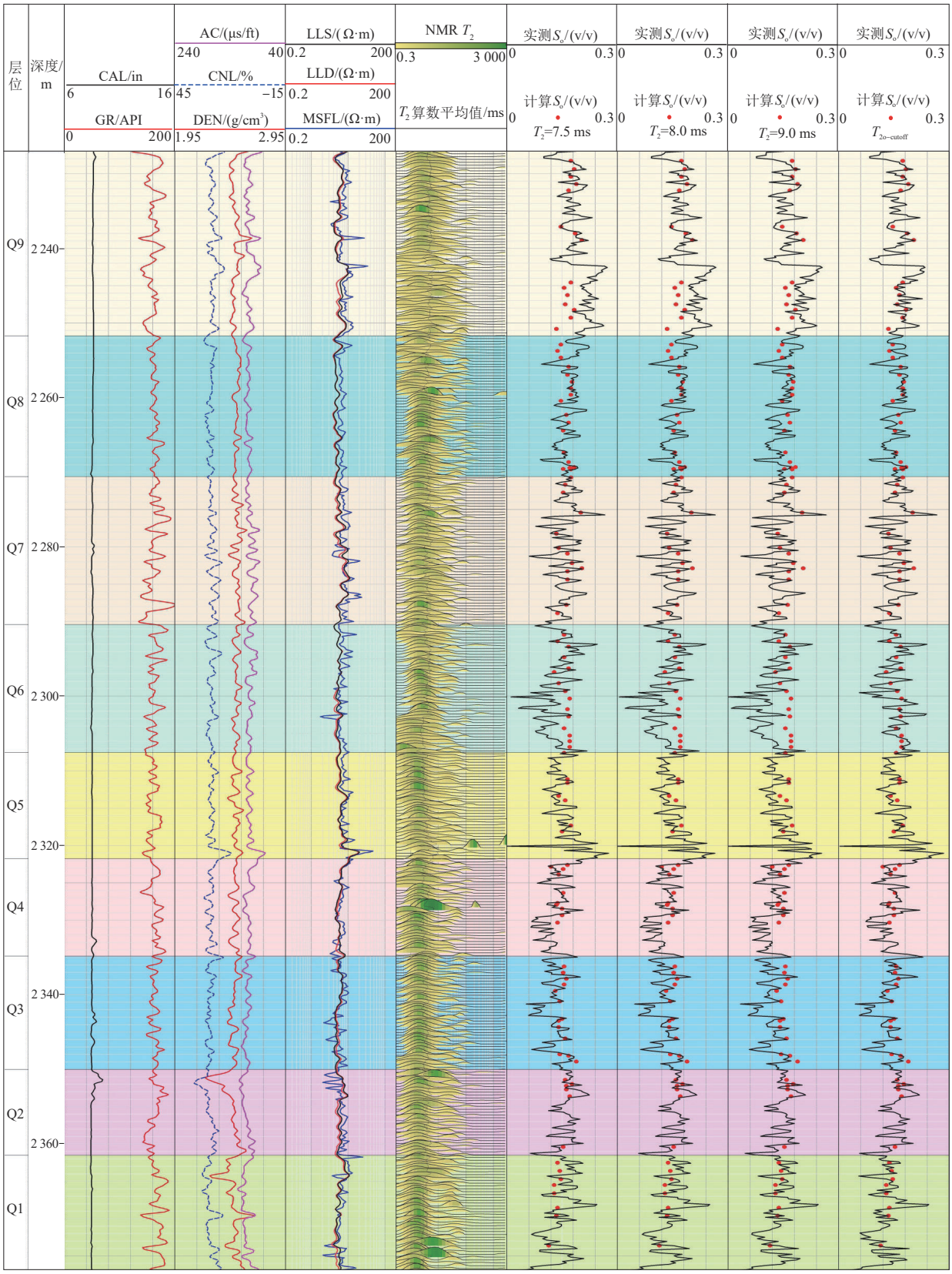

图9　松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩含油性核磁测井评价

Fig. 9　NMR log-based assessment results of the oil-bearing capacity of shales in the Qingshankou Formation, Gulong Sag, Songliao Basin

分中的占比得到脆性指数[公式(10)]，该方法很好地考虑到了岩层的非均质性。岩石力学脆性指数是通过纵、横波速计算动、静态杨氏模量和泊松比力学参数进而求取脆性指数[公式(11)]。阵列声波测井数据在反

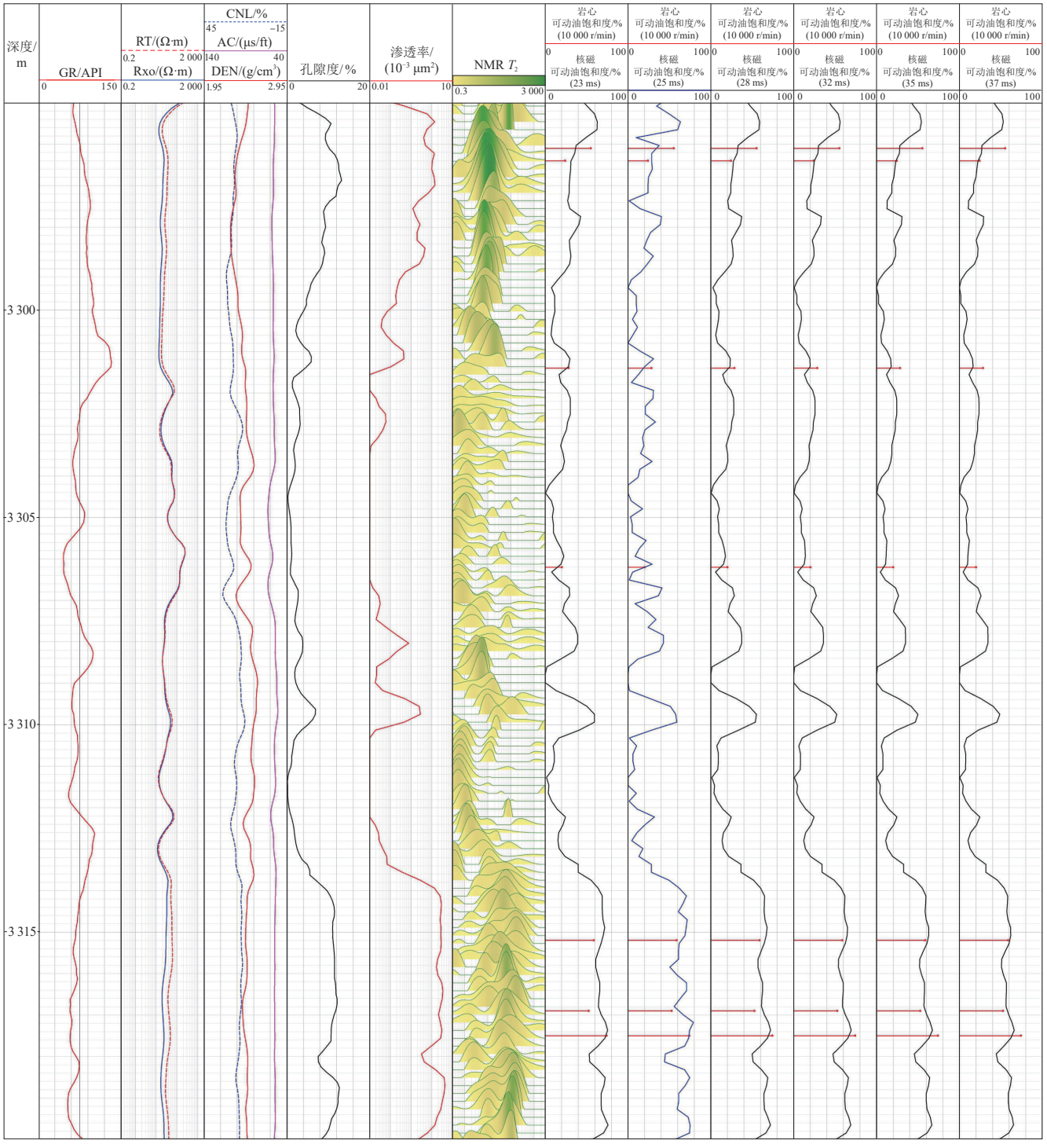

图10 准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组上甜点段致密砂岩可动油饱和度核磁测井评价

Fig. 10 NMR log-based assessment results of the movable oil saturation of tight sandstones in the upper sweet spots of the Lucaogou Formation, Jimusaer Sag, Junggar Basin

演过程中可以进行提波,从而获得纵、横波速数据。对未进行该系列测井数据采集的井,可以通过常规测井构建横波时差计算公式,再进行岩石力学参数的计算。对复杂非常规油气储层,单一脆性指数难以准确表征地层的可压性,有学者将矿物脆性法和岩石力学脆性法耦合,根据实际情况赋予两者不同权重,构建新的脆性指数模型[公式(12)]。

现今地应力的方向可通过成像测井井旁构造拾取获得的井壁崩落方向和诱导缝方向进行判别:现今最大地应力方向与诱导缝走向一致,与井壁崩落走向(最小地应力方向)垂直[78]。此外,还可通过阵列声波测井提取的快慢横波方位进行判识:快横波方向指示现

今最大地应力方向[59]。利用岩石力学参数可进一步获得最大、最小地应力及两向应力差[公式(13)—公式(17)](图 11)。两向应力差越小越容易形成复杂缝网，反之，则易形成单组裂缝，即裂缝易沿着某一方向延伸[108-109]。在压裂过程中形成的压裂缝网易沿最大水平主应力方向延展，而工程上为获得最大体积的缝网体系，水平井多沿最小主应力方向或小于30°夹角方向，射孔多沿最大水平主应力方向[59]。这样的工程设计既可以有效避免井壁崩落、垮塌、失稳，又能提高压裂效果[110]。

随着研究深入和勘探开发的不断深入，发现对于复杂的非常规油气储层，常用的脆性和应力差等参数优选的优势压裂井段实际生产效果与预测结果相差较远。有学者指出可以增加断裂韧性指数来提高预测的精度[111]。

$$BI_{\mathrm{m}}=\frac{W_{\mathrm{Quartz}}+W_{\mathrm{Feldspar}}+W_{\mathrm{Carbonate}}}{W_{\mathrm{Quartz}}+W_{\mathrm{Feldspar}}+W_{\mathrm{Carbonate}}+W_{\mathrm{Clay}}} \tag{10}$$

$$BI_{\mathrm{r}}=\frac{E+v}{2} \tag{11}$$

$$BI=aBI_{\mathrm{r}}+bBI_{\mathrm{m}} \tag{12}$$

$$p_0=g\int_0^{TVD}\rho_{\mathrm{b}}(z)\mathrm{d}z \tag{13}$$

$$p_{\mathrm{p}}=p_0-(p_0-p_{\mathrm{pn}})\times\alpha\times\frac{\Delta t_{\mathrm{n}}{}^{n}}{\Delta t_0} \tag{14}$$

$$SH_{\min}=\frac{v}{1-v}\times p_0-\frac{v}{1-v}\times\alpha p_{\mathrm{p}}+\alpha p_{\mathrm{p}}+\frac{E}{1-v^2}\times\varepsilon_{\mathrm{h}}+\frac{vE}{1-v^2}\times\varepsilon_{\mathrm{H}} \tag{15}$$

$$SH_{\max}=\frac{v}{1-v}\times p_0-\frac{v}{1-v}\times\alpha p_{\mathrm{p}}+\alpha p_{\mathrm{p}}+\frac{E}{1-v^2}\times\varepsilon_{H}+\frac{vE}{1-v^2}\times\varepsilon_{\mathrm{h}} \tag{16}$$

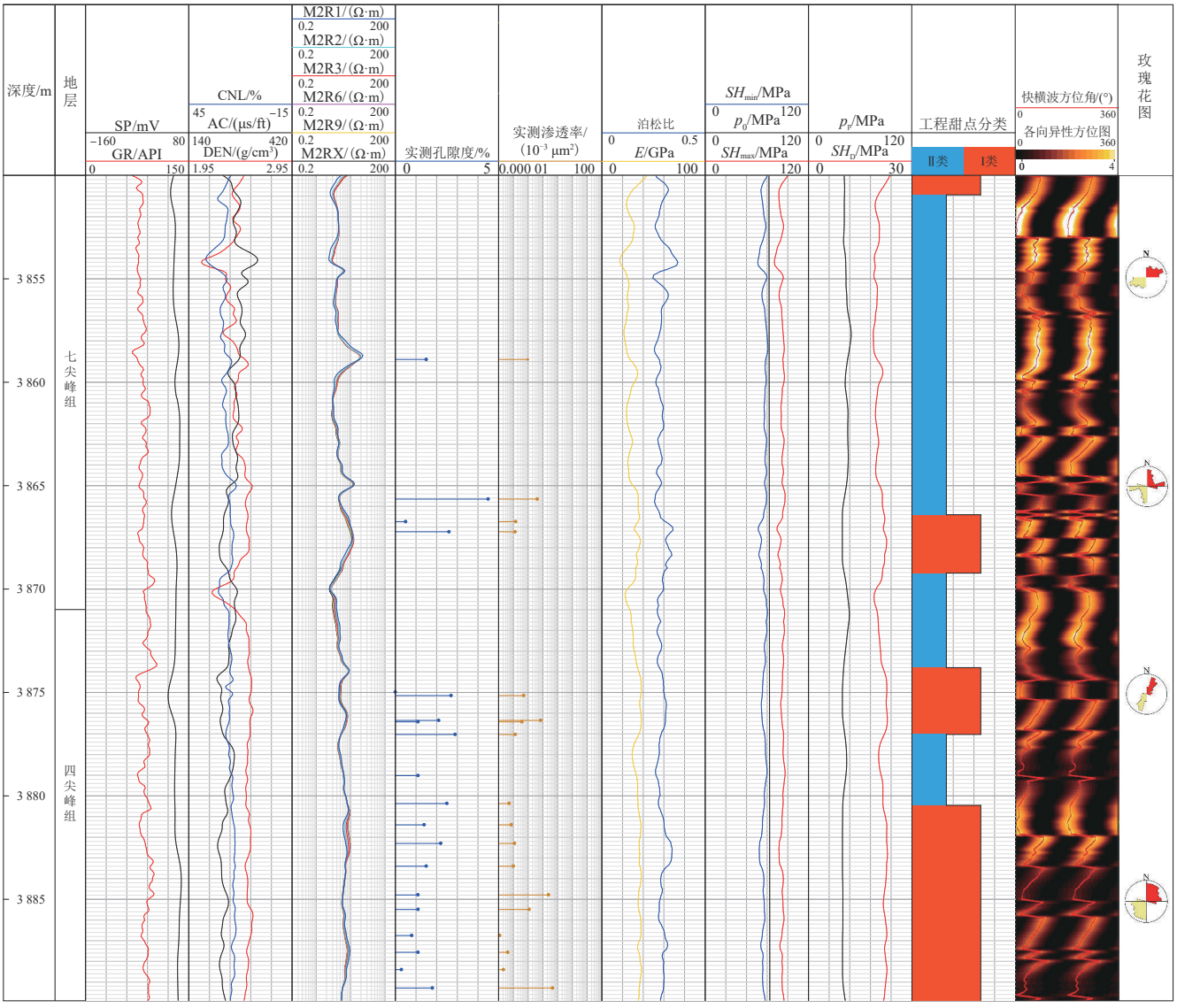

图 11　苏北盆地古近系阜宁组页岩可压性测井评价[111]

Fig. 11　Log-based assessment results of the fracability of shales in the Paleogene Funing Formation, Subei Basin[111]

$$SH_D = SH_{max} - SH_{min} \quad (17)$$

式中：BI_m为矿物脆性指数，无量纲；W_{Quartz}为石英含量，%；$W_{Feldsapr}$为长石含量，%；$W_{Carbonate}$为碳酸盐矿物含量，%；W_{Clay}为黏土矿物含量，%；BI_r为岩石力学脆性指数，无量纲；E为杨氏模型，无量纲；v为泊松比，无量纲；BI为脆性指数，无量纲；a和b分别为矿物脆性指数和岩石力学脆性指数各自的权重，无量纲，和为1；p_0为上覆地层应力，MPa；g为重力加速度，取9.8m/s^2；TVD为垂直深度，m；ρ_b为地层密度，g/cm^3；z为深度，m；p_p为孔隙压力，MPa；p_{pn}为正常压实孔隙压力，MPa；α为Eaton系数，取1；Δt_n为计算点对应的泥岩正常趋势线的声波时差，μs/ft；n为Eaton指数，取9；Δt_0为计算点泥岩测井声波时差，μs/ft；SH_{min}为最小水平主应力，MPa；α，ε_h和ε_H均为系数，无量纲；SH_{max}为最大水平主应力，MPa；SH_D为两向应力差，MPa。

3.8 水平井测井评价

致密砂岩油气和页岩油气无自然产能，在开发中需要水平井压裂改造获得产能[113-114]。井眼轨迹部署和水平井测井参数计算显得尤为重要。水平井靶区的精准选取和井眼轨迹的准确部署是水平井评价的前提。通过地质属性在测井上响应的正演模拟，构建地质解释模型，精确预测井眼轨迹分布层位。细粒沉积岩储层非均质性强、纵向分布和横向展布变化快，以导眼井为导向采用均质网格建立模型的水平井解释方法难以适用。因此，有学者建立了基于多井对比与相控的水平井三维精细建模技术[56]。该技术纵向上利用最小搜索方程和快速时间规整等算法进行多井地层对比，横向上以区域和多井沉积相变为约束，通过克里金和最小曲率等算法，实现相控约束下三维地层建模，为水平井井眼轨迹部署提供依据。

测井响应是地层固有属性、井眼形状、泥浆侵入和仪器测量位置的综合反映[115]。当测井仪器与地层平行时，测量结果与测量方位有关，不能再以直井模式对地层进行评价，需要进行真值反演和曲线校正，使得曲线能够真实反映地层信息。实验发现，在各向异性强的岩层中声波的纵、横波传播速度存在较大差异，因此，受各向异性影响的岩石物理属性，如渗透率、纵横波等，利用直井建立的测井评价参数模型需校正后才能用于水平井评价[116-117]，从而完成水平井储层参数精细解释与评价。

4 甜点分类、分级评价

地质-工程一体化是非常规油气资源实现效益最大化的核心理论，是甜点分类分级评价的指导方针。地质甜点主要指优势沉积微相和有利构造发育带控制下形成的储集层段，具有物性好、含油气饱和度高、层理缝/裂缝发育、源-储配置佳的特征[118]；工程甜点指可压裂性强、易形成复杂缝网、缝网开度易于保持的层段。除了常见的源-储分异储层，细粒沉积岩中还包含源-储一体储层，尤以纯页岩型、夹层型和互层型的页岩油气储层为典型代表，该类储层中烃源岩品质对于甜点的优选和开采具有重要意义。在压裂工艺中，根据细粒沉积岩中钙质和泥质含量设计压裂液的成分，如砂/液比、土酸类型和含量等，以期达到最佳压裂效果[117]。在裂缝发育带增大改造体积，在裂缝分布较少的层段增大裂缝延伸长度，同时结合“六性”明确压裂簇数和射孔点位。

因此，三品质评价成为细粒沉积岩甜点分类分级的重要手段。依据源-储配置、TOC、可溶烃含量(S_1)和含油气产率等参数建立烃源岩品质划分标准；利用有效孔隙度、含油气饱和度、裂缝密度、裂缝开度和纹层密度等指标建立储层品质分类方案；采用岩石力学参数、地应力大小、断裂韧性和脆性等指标建立工程品质评价标准。最后将三者耦合建立甜点分类方案[119]。优选“七性”参数中对产能影响大且计算精度较高的代表性参数，构建甜点综合评价指数模型。如郑建东[47]针对古龙页岩优选S_1、有效孔隙度、含油饱和度、脆性指数和破裂压力，将其归一化后，依据各参数与产量的关系赋予相应权重，建立β_{RCI}参数用于甜点评价[公式(18)]。根据评价指数及关键参数建立甜点分类分级划分标准，实现甜点定量识别与划分(图12)。

$$\beta_{RCI} = bS_1 + cB + d\Phi + eTOC + fS_o + gp_f \quad (18)$$

式中：β_{RCI}为储层综合评价指数，无量纲；S_1为可溶烃含量，mg/g；B为脆性指数，%；p_f为破裂压力，MPa；b—g为地区经验系数，无量纲。

5 前景与展望

新技术测井的高效应用使得细粒沉积岩中蕴含的非常规油气精准开发成效显著。充分利用LithoScanner测井在矿物组分(石英、长石和方解石等常见矿物，各类黏土矿物，特殊矿物黄铁矿和菱铁矿)及碳含量精细识别和计算的优势，实现各向异性强的岩层的岩性岩相、岩相组合甚至层序地层的纵向连续识别和刻画。二维核磁测井是目前识别流体类型、计算流体饱和度、评价非常规油气储层可动性最有利的手段，依据不同流体类型在横向和纵向弛豫时间差异界定氢氧根团

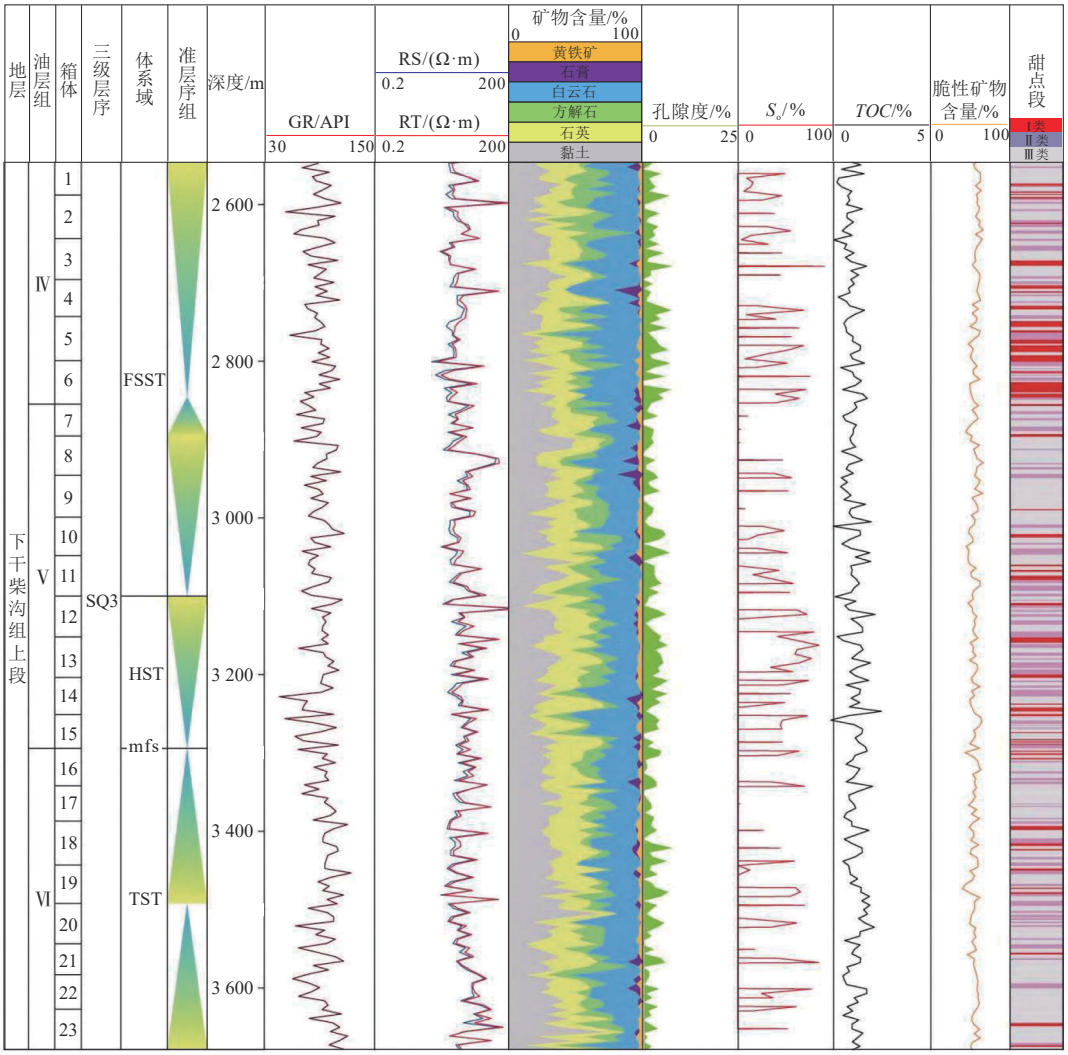

图 12　柴达木盆地下干柴沟组上段细粒混积岩甜点分级评价[117]

Fig. 12　Grading evaluation of the sweet spots in fine-grained mixed siliciclastic-carbonate rocks in the upper member of the Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin[117]

FSST. 下降体系域；HST. 高位体系域；TST. 海侵体系域；mfs. 最大湖泛面

组-沥青、束缚油、可动油、黏土矿物束缚水、毛管束缚水和可动水 T_1 和 T_2 取值范围。成像测井主要用于井旁构造拾取、沉积构造识别、层理缝和裂缝刻画、现今地应力方向判别等。得益于其纵向分辨率高达 5 mm 的优势，成像测井是目前毫米级纹层测井识别和评价最有效的方法。阵列声波测井提取的横波时差联合常规声波测井计算岩石力学参数和地层压力等，从而实现工程品质测井评价。然而，不同盆地不同沉积环境下形成的细粒沉积岩，具有其各自独特的地质特征和油气属性，各评价方法在应用时应因地制宜、适时调整，确保地质-工程一体化甜点评价过程中参数计算的准确性。此外，人工智能技术在能源领域日益崛起，机器学习和计算机视觉技术在地质评价（包括岩性识别、岩相刻画、储层参数计算、地震资料处理与解释等）方面应用潜力巨大；深度学习、最优化和数据挖掘技术在工程开发领域应用成效显著。非常规油气资源的高效开发向着自动化方向发展，包括智能化处理与解释、专业软件集成平台、自动化生产装备等。未来人工智能在非常规油气开发具有重要意义。

参　考　文　献

[1] KRUMBEIN W C. The mechanical analysis of fine-grained sediments [J]. Journal of Sedimentary Research, 1932, 2(3): 140-149.

[2] GHADEER S G, MACQUAKER J H S. Sediment transport processes in an ancient mud-dominated succession: A comparison of processes operating in marine offshore settings and anoxic basinal environments [J]. Journal of the Geological Society, 2011, 168(5): 1121-1132.

[3] 李哲萱，柳益群，焦鑫，等. 火山—热液作用相关细粒沉积岩研究现状及前沿探索[J]. 古地理学报，2019，21(5)：727-742.
LI Zhexuan，LIU Yiqun，JIAO Xin，et al. Progress and present research on volcanic-hydrothermal related fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2019，21(5)：727-742.

[4] 姜在兴，梁超，吴靖，等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报，2013，34(6)：1031-1039.
JIANG Zaixing，LIANG Chao，WU Jing，et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica，2013，34(6)：1031-1039.

[5] 吴靖，姜在兴，梁超. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系[J]. 石油学报，2017，38(10)：1110-1122.
WU Jing，JIANG Zaixing，LIANG Chao. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation，Dongying sag and their relationship with sedimentary environment[J]. Acta Petrolei Sinica，2017，38(10)：1110-1122.

[6] APLIN A C，MACQUAKER J H S. Mudstone diversity：Origin and implications for source，seal，and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin，2011，95(12)：2031-2059.

[7] 邹才能，杨智，朱如凯，等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报，2015，89(6)：979-1007.
ZOU Caineng，YANG Zhi，ZHU Rukai，et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica，2015，89(6)：979-1007.

[8] SAIDIAN M，PRASAD M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity：A case study of Middle Bakken and Three Forks formations[J]. Fuel，2015，161：197-206.

[9] HILL R J，ZHANG Etuan，KATZ B J，et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale，Fort Worth Basin，Texas[J]. AAPG Bulletin，2007，91(4)：501-521.

[10] LOUCKS R G，REED R M，RUPPEL S C，et al. Morphology，genesis，and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale[J]. Journal of Sedimentary Research，2009，79(12)：848-861.

[11] SCHIEBER J，SOUTHARD J B. Bedload transport of mud by floccule ripples—Direct observation of ripple migration processes and their implications[J]. Geology，2009，37(6)：483-486.

[12] 操应长，梁超，韩豫，等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. 古地理学报，2023，25(4)：729-741.
CAO Yingchang，LIANG Chao，HAN Yu，et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2023，25(4)：729-741.

[13] 施振生，赵圣贤，周天琪，等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质，2023，44(6)：1499-1514.
SHI Zhensheng，ZHAO Shengxian，ZHOU Tianqi，et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas：A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin，China[J]. Oil & Gas Geology，2023，44(6)：1499-1514.

[14] 李敏，刘雅利，冯动军，等. 中国海相页岩气资源潜力及未来勘探方向[J]. 石油实验地质，2023，45(6)：1097-1108.
LI Min，LIU Yali，FENG Dongjun，et al. Potential and future exploration direction of marine shale gas resources in China[J]. Petroleum Geology and Experiment，2023，45(6)：1097-1108.

[15] 张顺，刘惠民，张鹏飞，等. 东营凹陷中低成熟度富碳酸盐页岩地质特征——以牛庄洼陷沙四段上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报，2022，51(6)：1138-1151.
ZHANG Shun，LIU Huimin，ZHANG Pengfei，et al. Geological characteristics of shale oil enrichment in Niuzhuang Sag，Dongying Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2022，51(6)：1138-1151.

[16] 鄢继华，焦玉玺，陈世悦，等. 沧东凹陷始新统孔店组二段深水细粒沉积岩中的软沉积物变形构造[J]. 古地理学报，2017，19(1)：89-98.
YAN Jihua，JIAO Yuxi，CHEN Shiyue，et al. Soft-sediment deformation structures in deepwater fine-grained sedimentary rocks of the Member 2 of Eocene Kongdian Formation，Cangdong Sag[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2017，19(1)：89-98.

[17] 赵贤正，蒲秀刚，韩文中，等. 细粒沉积岩性识别新方法与储集层甜点分析——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发，2017，44(4)：492-502.
ZHAO Xianzheng，PU Xiugang，HAN Wenzhong，et al. A new method for lithology identification of fine grained deposits and reservoir sweet spot analysis：A case study of Kong 2 Member in Cangdong Sag，Bohai Bay Basin，China[J]. Petroleum Exploration and Development，2017，44(4)：492-502.

[18] 袁选俊，林森虎，刘群，等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. 石油勘探与开发，2015，42(1)：34-43.
YUAN Xuanjun，LIN Senhu，LIU Qun，et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern：A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin，NW China[J]. Petroleum Exploration and Development，2015，42(1)：34-43.

[19] 何宗杭，陆子杰，李玉，等. 鄂尔多斯盆地延长组长72油层组陆相页岩纹层及裂缝分布特征的量化表征[J]. 石油科学通报，2024，9(1)：21-34.
HE Zonghang，LU Zijie，LI Yu，et al. Quantitative characterization of the distribution characteristics of conti-nental shale laminas and cracks in the Chang 72 Oil Group of Yanchang Formation，Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin，2024，9(1)：21-34.

[20] 吕文雅，曾联波，周思宾，等. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩

储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长 8 储层为例[J]. 天然气地球科学，2020，31(1)：37-46.
LYU Wenya，ZENG Lianbo，ZHOU Sibin，et al. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin：Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe Oilfield[J]. Natural Gas Geoscience，2020，31(1)：37-46.

[21] 符印，王作栋，张婷，等. 烃源岩中类胡萝卜烷系列化合物的检出及其地质意义——以三塘湖盆地马芦 1 井芦草沟组为例[J]. 沉积学报，2024，42(3)：1092-1106.
FU Yin，WANG Zuodong，ZHANG Ting，et al. Detection and geological significance of carotenoid-derived alkanes in the source rocks：A case of Well Malu 1，Lucaogou Formation，Santanghu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2024，42(3)：1092-1106.

[22] 郭小波，黄志龙，陈旋，等. 马朗凹陷芦草沟组泥页岩储层含油性特征与评价[J]. 沉积学报，2014，32(1)：166-173.
GUO Xiaobo，HUANG Zhilong，CHEN Xuan，et al. The oil-bearing property characteristics and evaluation of Lucaogou Formation shale reservoirs in Malang Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2014，32(1)：166-173.

[23] 李书琴，印森林，高阳，等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J]. 天然气地球科学，2020，31(2)：235-249.
LI Shuqin，YIN Senlin，GAO Yang，et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation，Jimsar Sag，Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience，2020，31(2)：235-249.

[24] 马克，侯加根，刘钰铭，等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组咸化湖混合沉积模式[J]. 石油学报，2017，38(6)：636-648.
MA Ke，HOU Jiagen，LIU Yuming，et al. The sedimentary model of saline lacustrine mixed sedimentation in Permian Lucaogou Formation，Jimsar Sag[J]. Acta Petrolei Sinica，2017，38(6)：636-648.

[25] PANG Xiaojiao，WANG Guiwen，KUANG Lichun，et al. Insights into the pore structure and oil mobility in fine-grained sedimentary rocks：The Lucaogou Formation in Jimusar Sag，Junggar Basin，China[J]. Marine and Petroleum Geology，2022，137：105492.

[26] 黄玉越，王贵文，宋连腾，等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析[J]. 古地理学报，2022，24(3)：540-555.
HUANG Yuyue，WANG Guiwen，SONG Lianteng，et al. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reservoir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag，Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2022，24(3)：540-555.

[27] 陆国青，董少群，黄立良，等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组陆相页岩油储层测井裂缝智能识别[J]. 地球科学，2023，48(7)：2690-2702.
LU Guoqing，DONG Shaoqun，HUANG Liliang，et al. Fracture intelligent identification using well logs of continental shale oil reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag，Junggar Basin[J]. Earth Science，2023，48(7)：2690-2702.

[28] LIU Bo，WANG Haoli，FU Xiaofei，et al. Lithofacies and depositional setting of a highly prospective lacustrine shale oil succession from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the Gulong Sag，northern Songliao Basin，Northeast China[J]. AAPG Bulletin，2019，103(2)：405-432.

[29] PANG Xiaojiao，WANG Guiwen，MOUNTNEY N P，et al. Prediction of lamina structure and reservoir quality in shale using well logs：The Cretaceous Qingshankou Formation，Gulong Sag，Songliao Basin，China[J]. Geoenergy Science and Engineering，2023，227：211827.

[30] LIU Xiaoping，LAI Jin，FAN Xuechun，et al. Insights in the pore structure，fluid mobility and oiliness in oil shales of Paleogene Funing Formation in Subei Basin，China[J]. Marine and Petroleum Geology，2020，114：104228.

[31] 吴文祥，张海翔，李占东，等. 层序地层地球化学方法在烃源岩评价中的应用——以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J]. 石油与天然气地质，2015，36(4)：701-710.
WU Wenxiang，ZHANG Haixiang，LI Zhandong，et al. Sequence stratigraphic geochemistry and its application in evaluation of source rocks：Taking Beier Sag of Hailar Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology，2015，36(4)：701-710.

[32] 崔宝文，张顺，付秀丽，等. 松辽盆地古龙页岩有机层序地层划分及影响因素[J]. 大庆石油地质与开发，2021，40(5)：13-28.
CUI Baowen，ZHANG Shun，FU Xiuli，et al. Organic sequence stratigraphic division and its influencing factors' analyses for Gulong shale in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing，2021，40(5)：13-28.

[33] 孙晓晗，屈红军，黄苏卫，等. 高分辨率层序地层学在北部湾盆地重点层系选段中的应用[J]. 古地理学报，2024，26(2)：308-325.
SUN Xiaohan，QU Hongjun，HUANG Suwei，et al. Application of high resolution sequence stratigraphy to determination of key intervals in Beibuwan Basin[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2024，26(2)：308-325.

[34] 黎茂稳，马晓潇，金之钧，等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质，2022，43(1)：1-25.
LI Maowen，MA Xiaoxiao，JIN Zhijun，et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology，2022，43(1)：1-25.

[35] 郭旭升，马晓潇，黎茂稳，等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质，2023，44(6)：1333-1349.
GUO Xusheng，MA Xiaoxiao，LI Maowen，et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology，2023，44(6)：1333-1349.

[36] 李进步. 页岩油赋存机理及可动性研究——以济阳坳陷沙河街组为例[D]. 青岛：中国石油大学(华东)，2020.
LI Jinbu. Study on occurrence mechanism and mobility of shale oil：A case study of Shahejie Formation in Jiyang Depression[D]. Qingdao：China University of Petroleum(East China)，2020.

[37] 梁超. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2015.
LIANG Chao. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.

[38] 朱如凯，邹才能，吴松涛，等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质，2019，40(6)：1168-1184.
ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.

[39] 王鑫锐，孙雨，刘如昊，等. 陆相湖盆细粒沉积岩特征及形成机理研究进展[J]. 沉积学报，2023，41(2)：349-377.
WANG Xinrui, SUN Yu, LIU Ruhao, et al. Research progress into fine-grained sedimentary rock characteristics and formation in a continental lake basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(2): 349-377.

[40] 沈均均，杨丽亚，王玉满，等. 中扬子西部下古生界页岩沉积古环境[J/OL]. 沉积学报：1-28[网络访问日期缺失]. https://doi. org/10. 14027/j. issn. 1000-0550. 2023. 056.
SHEN Junjun, YANG Liya, WANG Yuman, et al. Paleoenvironment of Lower Paleozoic Shale Sediments in the Western Central Yangtze[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-28[网络访问日期缺失]. https://doi. org/10. 14027/j. issn. 1000-0550. 2023. 056.

[41] 董欣君，冯振东，宁淑媛，等. 东营凹陷沙四上细粒沉积岩段米兰科维奇旋回及沉积响应[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，2022，41(2)：46-56.
DONG Xinjun, FENG Zhendong, NING Shuyuan, et al. Milankovitch cycle and sedimentary response of the $Es4_s^2$ fine-grained sedimentary rocks in Dongying Depression[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022, 41(2): 46-56.

[42] 刘可禹，刘畅. “化学-沉积相”分析：一种研究细粒沉积岩的有效方法[J]. 石油与天然气地质，2019，40(3)：491-503.
LIU Keyu, LIU Chang. “Chemo-sedimentary facies” analysis: An effective method to study fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 491-503.

[43] 操应长，姜在兴，夏斌，等. 利用测井资料识别层序地层界面的几种方法[J]. 石油大学学报(自然科学版)，2003，27(2)：23-26.
CAO Yingchang, JIANG Zaixing, XIA Bin, et al. Some methods for identifying sequence boundaries and condensation sections using well logging[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 23-26.

[44] 陈茂山. 测井资料的两种深度域频谱分析方法及在层序地层学研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探，1999，34(1)：57-64，122.
CHEN Maoshan. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data and their application to sequence stratigraphy research[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(1): 57-64, 122.

[45] 崔维平，杨玉卿. 基于电成像测井资料的储层精细评价[J]. 石油天然气学报，2014，36(11)：90-96，7.
CUI Weiping, YANG Yuqing. Fine reservoir evaluation based on electrical imaging logging data[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(11): 90-96, 7.

[46] 匡立春，侯连华，杨智，等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报，2021，42(1)：1-14.
KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 1-14.

[47] 郑建东，王春燕，章华兵，等. 松辽盆地古龙页岩油储层七性参数和富集层测井评价方法[J]. 大庆石油地质与开发，2021，40(5)：87-97.
ZHENG Jiandong, WANG Chunyan, ZHANG Huabing, et al. Logging evaluating methods of seven property parameters and enriched layers for Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 87-97.

[48] LAI Jin, BAI Tianyu, LI Hongbin, et al. Geological and engineering ‘sweet spots’ in the Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2023, 97(4): 1214-1228.

[49] 金之钧，王冠平，刘光祥，等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报，2021，42(7)：821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.

[50] 杨智，侯连华，陶士振，等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. 石油勘探与开发，2015，42(5)：555-565.
YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.

[51] 黎茂稳，马晓潇，蒋启贵，等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率，2019，26(1)：13-28.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.

[52] 聂海宽，张金川，金之钧，等. 论海相页岩气富集机理——以四川盆地五峰组—龙马溪组为例[J]. 地质学报，2024，98(3)：975-991.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, et al. Enrichment mechanism of marine shale gas——A case study of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(3): 975-991.

[53] 赵文智，朱如凯，刘伟，等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘，2023，30(1)：116-127.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 116-127.

[54] 邹才能，杨智，董大忠，等. 非常规源岩层系油气形成分布与

前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.
ZOU Caineng, YANG Zhi, DONG Dazhong, et al. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1517-1533.

[55] 赖锦, 白天宇, 苏洋, 等. 烃源岩测井识别与评价方法研究进展[J]. 地质论评, 2024, 70(2): 721-741.
LAI Jin, BAI Tianyu, SU Yang, et al. Researches progress in well log recognition and evaluation of source rocks[J]. Geological Review, 2024, 70(2): 721-741.

[56] 李宁, 冯周, 武宏亮, 等. 中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 28-44.
LI Ning, FENG Zhou, WU Hongliang, et al. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 28-44.

[57] 闫伟林, 张兆谦, 陈龙川, 等. 基于核磁共振技术的古龙页岩含油饱和度评价新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 78-86.
YAN Weilin, ZHANG Zhaoqian, CHEN Longchuan, et al. New evaluating method of oil saturation in Gulong shale based on NMR technique[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 78-86.

[58] 赖锦, 王贵文, 庞小娇, 等. 测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1804-1828.
LAI Jin, WANG Guiwen, PANG Xiaojiao, et al. The past, present and future of well logging geology——To celebrate the publication of second edition of "Well Logging Geology"[J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1804-1828.

[59] 赖锦, 李红斌, 张梅, 等. 非常规油气时代测井地质学研究进展[J]. 古地理学报, 2023, 25(5): 1118-1138.
LAI Jin, LI Hongbin, ZHANG Mei, et al. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(5): 1118-1138.

[60] 刘国强. 非常规油气时代的测井采集技术挑战与对策[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 24-37.
LIU Guoqiang. Challenges and countermeasures of well logging data acquisition technology in unconventional petroleum exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 24-37.

[61] 孙颖. 核磁共振在页岩储层参数评价中的应用综述[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 254-270.
SUN Ying. Review of the application of nuclear magnetic resonance in the evaluation of shale reservoir parameters[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 254-270.

[62] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(04): 957-969.
PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale—A case study on Es4scs in Well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 957-969.

[63] 周妍, 王长胜, 林伟川, 等. 页岩油烃源岩地化参数测井评价方法及应用[J]. 测井技术, 2022, 46(3): 334-339.
ZHOU Yan, WANG Changsheng, LIN Weichuan, et al. Evaluation method and application for geochemical parameters of shale oil source rock[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3): 334-339.

[64] 胡胜福, 周灿灿, 李霞, 等. 测井饱和度解释模型的演化历程分析与思考[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 1992-1998.
HU Shengfu, ZHOU Cancan, LI Xia, et al. Analysis and prospect of logging saturation model evolutionary history[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 1992-1998.

[65] 李潮流, 闫伟林, 武宏亮, 等. 富黏土页岩储集层含油饱和度计算方法——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1168-1178.
LI Chaoliu, YAN Weilin, WU Hongliang, et al. Calculation of oil saturation in clay-rich shale reservoirs: A case study of Qing 1 Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1168-1178.

[66] ABDUL QADER AL-OJAILI W, RAGAB SHALABY M, BAUER W. Reservoir quality evaluation of the Narimba Formation in Bass Basin, Australia: Implications from petrophysical analysis, sedimentological features, capillary pressure and wetting fluid saturation[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(1): 100220.

[67] VENIERI M, PEDERSEN P K, EATON D W. Predicting unconventional reservoir potential from wire-line logs: A correlation between compositional and geomechanical properties of the Duvernay shale play of western Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(5): 865-881.

[68] YUAN Junliang, ZHOU Jianliang, LIU Shujie, et al. An improved fracability-evaluation method for shale reservoirs based on new fracture toughness-prediction models[J]. SPE Journal, 2017, 22(5): 1704-1713.

[69] 庞小娇. 古龙页岩油储层纹理岩石物理响应机理及测井表征方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
PANG Xiaojiao. Petrophysical response mechanism andlogging evaluation of shale oil reservoirs inthe Gulong Sag, Songliao Basin, China[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

[70] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.

[71] 朱毅秀, 金振奎, 金科, 等. 中国陆相湖盆细粒沉积岩岩石学特征及成岩演化表征——以四川盆地元坝地区下侏罗统大安寨段为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 494-508.
ZHU Yixiu, JIN Zhenkui, JIN Ke, et al. Petrologic features and diagenetic evolution of fine-grained sedimentary rocks in

continental lacustrine basins: A case study on the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 494-508.

[72] 梁超, 姜在兴, 杨镱婷, 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.

[73] 施振生, 王红岩, 赵圣贤, 等. 川南地区上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 788-805.
SHI Zhensheng. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(4): 788-805.

[74] 谭茂金, 武宏亮, 王思宇, 等. 中国海相页岩气测井评价技术进展与发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 241-260.
TAN Maojin, WU Hongliang, WANG Siyu, et al. Progress and development direction of log interpretation technology for marine shale gas in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 241-260.

[75] 解习农, 郝芳, 陆永潮, 等. 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1045-1056.
XIE Xinong, HAO Fang, LU Yongchao, et al. Differential enrichment mechanism and key technology of shale gas in complex areas of South China [J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1045-1056.

[76] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.

[77] COMERIO M, FERNÁNDEZ D E, RENDTORFF N, et al. Depositional and postdepositional processes of an oil-shale analog at the microstructure scale: The Lower Cretaceous Agrio Formation, Neuquén Basin, northern Patagonia[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(8): 1679-1705.

[78] PANG Xiaojiao, WANG Guiwen, KUANG Lichun, et al. Lamellation fractures in shale oil reservoirs: Recognition, prediction and their influence on oil enrichment[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 148: 106032.

[79] 熊亮, 杨振恒, 申宝剑, 等. 川南威荣地区五峰组—龙马溪组深层页岩气微观储集空间发育特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 860-872.
XIONG Liang, YANG Zhenheng, SHEN Baojian, et al. Micro reservoir space characteristics and significance of deep shale gas in Wufeng-Longmaxi formations in Weirong area, South Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 860-872.

[80] 刘羽汐, 白斌, 曹健志, 等. 海陆相页岩型页岩油地质特征的差异与甜点评价——以北美二叠盆地Wolfcamp D页岩油与松辽盆地古龙页岩油为例[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 55-65.
LIU Yuxi, BAI Bin, CAO Jianzhi, et al. Differences in geological characteristics and sweet spots evaluation of marine and continental shale oil: a comparative case study between Wolfcamp D shale oil in Permian Basin in North America and Gulong shale oil in Songliao Bsain[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 55-65.

[81] 姜在兴, 王运增, 王力, 等. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运-沉积机制及多源油气甜点[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(05): 1039-1048.
JIANG Zaixing, WANG Yunzeng, WANG Li, et al. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1039-1048.

[82] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 6-15.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, DENG Yuan, et al. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 6-15.

[83] 师良, 王香增, 范柏江, 等. 鄂尔多斯盆地延长组砂质纹层发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 522-530.
SHI Liang, WANG Xiangzeng, FAN Baijiang, et al. Characteristics of sandy lamination and its hydrocarbon accumulation, Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 522-530.

[84] 陈世悦, 张顺, 刘惠民, 等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 271-284.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, LIU Huimin, et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(2): 271-284.

[85] 毛俊莉, 张金川, 刘通, 等. 辽河西部凹陷页岩纹层结构及其储集空间意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 113-120.
MAO Junli, ZHANG Jinchuan, LIU Tong, et al. Laminated texture of shale and its storage space significance in Western Depression, Liaohe Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(1): 113-120.

[86] 朱筱敏, 董艳蕾, 刘成林, 等. 中国含油气盆地沉积研究主要科学问题与发展分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 1-11.
ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, LIU Chenglin, et al. Major challenges and development in Chinese sedimentological research on petroliferous basins [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 1-11.

[87] 徐敬领, 王贵文, 刘洛夫. 利用小波深频分析方法研究沉积储层旋回[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(5): 1-5.
XU Jingling, WANG Guiwen, LIU Luofu. Study of sedimentary reservoir cycles using wavelet depth-frequency analysis method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural

Science)，2009，33(5)：1-5.

[88] 石巨业，金之钧，刘全有，等. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J]. 地学前缘，2023，30(4)：142-151.
SHI Juye，JIN Zhijun，LIU Quanyou，et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers，2023，30(4)：142-151.

[89] 张莹. 高分辨率层序地层学与储层测井综合评价在岩性地层油气藏中的应用[D]. 长春：吉林大学，2007.
ZHANG Ying. The application of high resolution sequence stratigraphy and log evaluation in subtle reservoirs [D]. Changchun：Jilin University，2007.

[90] 邹才能，赵群，王红岩，等. 中国海相页岩气主要特征及勘探开发主体理论与技术[J]. 天然气工业，2022，42(8)：1-13.
ZOU Caineng，ZHAO Qun，WANG Hongyan，et al. The main characteristics of marine shale gas and the theory & technology of exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry，2022，42(8)：1-13.

[91] 邹才能，董大忠，熊伟，等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. 石油与天然气地质，2024，45(2)：309-326.
ZOU Caineng，DONG Dazhong，XIONG Wei，et al. Advances，challenges，and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays，sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology，2024，45(2)：309-326.

[92] 张占松. 测井资料识别层序的方法及问题讨论[J]. 石油勘探与开发，2000，27(5)：119-121.
ZHANG Zhansong. Stratigraphic sequence recognition by log data and its discussion[J]. Petroleum Exploration and Development，2000，27(5)：119-121.

[93] 陈宏逵，朱筱敏，肖坤叶，等. 乍得Doseo盆地东部坳陷下白垩统Kedeni组层序地层格架与沉积体系分布[J]. 古地理学报，2024，26(4)：796-815.
CHEN Hongkui，ZHU Xiaomin，XIAO Kunye，et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary system of the Lower Cretaceous Kedeni Formation in eastern depression of Doseo Basin，Chad[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，2024，26(4)：796-815.

[94] 徐敬领，王贵文. 利用测井资料时频特征进行地层对比的方法及其应用[J]. 测井技术，2009，33(2)：120-125.
XU Jingling，WANG Guiwen. A method of log data time-frequency characteristics stratum correlation and its application [J]. Well Logging Technology，2009，33(2)：120-125.

[95] 栾旭伟，孔祥鑫，张金亮，等. 天文旋回约束下东营凹陷中始新统含碳酸盐细粒沉积岩成因分析[J]. 沉积学报，2024，42(2)：688-700.
LUAN Xuwei，KONG Xiangxin，ZHANG Jinliang，et al. Astronomical forcing of origins of eocene carbonate-bearing fine-grained sedimentary rock in Dongying Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica，2024，42(2)：688-700.

[96] AZIZ H，EHSAN M，ALI A，et al. Hydrocarbon source rock evaluation and quantification of organic richness from correlation of well logs and geochemical data：A case study from the Sembar Formation，Southern Indus Basin，Pakistan [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2020，81：103433.

[97] IQBAL O，AHMAD M，KADIR A A. Effective evaluation of shale gas reservoirs by means of an integrated approach to petrophysics and geomechanics for the optimization of hydraulic fracturing：A case study of the Permian Roseneath and Murteree Shale Gas reservoirs，Cooper Basin，Australia[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2018，58：34-58.

[98] 蒋云箭，刘惠民，柴春艳，等. 济阳坳陷页岩油测井评价[J]. 油气地质与采收率，2023，30(1)：21-34.
JIANG Yunjian，LIU Huimin，CHAI Chunyan，et al. Logging evaluation of shale oil in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2023，30(1)：21-34.

[99] 卢妍欣，包书景，周志，等. 高热演化页岩总有机碳地球物理预测方法研究进展[J]. 地球物理学进展，2023，38(1)：229-241.
LU Yanxin，BAO Shujing，ZHOU Zhi，et al. Research progress of geophysical prediction methods for total organic carbon in high-thermal evolution shale[J]. Progress in Geophysics，2023，38(1)：229-241.

[100] 朱建伟，赵刚，刘博，等. 油页岩测井识别技术及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2012，42(2)：289-295.
ZHU Jianwei，ZHAO Gang，LIU Bo，et al. Identification technology and it's application of well-logging about oil shale[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition)，2012，42(2)：289-295.

[101] PANG Xiaojiao，WANG Guiwen，KUANG Lichun，et al. Prediction of multiscale laminae structure and reservoir quality in fine-grained sedimentary rocks：The Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag，Junggar Basin[J]. Petroleum Science，2022，19(6)：2549-2571.

[102] 匡立春，刘合，任义丽，等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发，2021，48(1)：1-11.
KUANG Lichun，LIU He，REN Yili，et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development，2021，48(1)：1-11.

[103] 李红斌，王贵文，王松，等. 基于Kohonen神经网络的页岩油岩相测井识别方法——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 沉积学报，2022，40(3)：626-640.
LI Hongbin，WANG Guiwen，WANG Song，et al. Shale oil lithofacies identification by Kohonen neural network method：The case of the Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2022，40(3)：626-640.

[104] 李宁，王克文，武宏亮，等. 渗透率测井评价：现状及发展方向[J]. 石油科学通报，2023，8(4)：432-444.
LI Ning，WANG Kewen，WU Hongliang，et al. Permeability logging evaluation：Current status and development directions[J].

Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 432-444.

[105] 王松. 准噶尔盆地陆相页岩油储层质量差异性测井表征方法研究——以玛湖凹陷风城组为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
WANG Song. Logging Characterization method of continental shale oil reservoir quality variation in Junggar Basin—A case study of the Fengcheng Formation in Mahu Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.

[106] 刘国强. 非常规油气勘探测井评价技术的挑战与对策[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 891-902.
LIU Guoqiang. Challenges and countermeasures of log evaluation in unconventional petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 891-902.

[107] 李军, 邹友龙, 路菁. 陆相页岩油储层可动油含量测井评价方法——以苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(03): 816-826.
LI Jun, ZOU Youlong, LU Jing. Well-log-based assessment of movable oil content in lacustrine shale oil reservoirs: A case study of the 2 nd member of the Funing Formation, Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(03): 816-826.

[108] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.

[109] 李阳, 赵清民, 吕琦, 等. 中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 955-964.
LI Yang, ZHAO Qingmin, LV Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.

[110] 贾长贵, 路保平, 蒋廷学, 等. DY2 HF深层页岩气水平井分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 85-90.
JIA Changgui, LU Baoping, JIANG Tingxue, et al. Multi-stage horizontal well fracturing technology in deep shale gas well DY2 HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 85-90.

[111] 金衍, 陈勉, 张旭东. 利用测井资料预测深部地层岩石断裂韧性[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 454-456.
JIN Yan, CHEN Mian, ZHANG Xudong. Determination of fracture toughness for deep well rock with geophysical logging data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 454-456.

[112] 李红斌, 王贵文, 庞小娇, 等. 苏北盆地古近系阜宁组页岩工程品质测井评价[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 311-322.
LI Hongbin, WANG Guiwen, PANG Xiaojiao, et al. Logging evaluation of the engineering quality of the Paleogene Funing Formation oil shales in the Subei Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 311-322.

[113] 刘小明. 大庆油田致密油水平井体积改造技术发展与建议[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(4): 108-112.
LIU Xiaoming. Development and suggestions for volume transformation of tight oil by horizontal wells in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(4): 108-112.

[114] 蒋恕, 李园平, 杜凤双, 等. 提高页岩气藏压裂井射孔簇产气率的技术进展[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 9-22.
JIANG Shu, LI Yuanping, DU Fengshuang, et al. Recent advancement for improving gas production rate from perforated clusters in fractured shale gas reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 9-22.

[115] 周灿灿, 王昌学. 水平井测井解释技术综述[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 152-160.
ZHOU Cancan, WANG Changxue. Technology review on the log interpretation of horizontal well [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 152-160.

[116] 张兆谦, 闫伟林, 宋延杰, 等. 基于交错网格有限差分算法的页岩声波各向异性校正方法研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(4): 1570-1582.
ZHANG Zhaoqian, YAN Weilin, SONG Yanjie, et al. Study on acoustic anisotropy correction method of shale based on staggered grid finite difference[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(4): 1570-1582.

[117] 闫伟林, 殷树军, 马宏宇, 等. 大庆油田裸眼井测井技术进展与展望[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 109-118.
YAN Weilin, YIN Shujun, MA Hongyu, et al. Progress and prospects of open-hole well logging technology in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 109-118.

[118] 王红岩, 施振生, 周天琪, 等. 海相黑色页岩甜点类型、特征及页岩气勘探意义——以四川盆地南部五峰组—龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2023, 43(10): 1-13.
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, et al. Types and characteristics of sweet spots of marine black shale and significance for shale gas exploration: A case study of Wufeng-Longmaxi in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(10): 1-13.

[119] 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.

[120] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 18-31.

(编辑 张玉银)