

深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价关键技术进展

武宏亮¹, 赖强², 冯周¹, 信毅³, 李潮流¹, 刘鹏¹, 李雨生¹, 田瀚¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610041
3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要: 随着我国油气勘探不断向深层-超深层领域拓展, 测井面临着超高温高压、恶劣井筒环境和低信噪比等技术挑战。针对深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价难点, 本文重点讨论了目前制约油气勘探开发的四项关键技术问题: 岩性岩相识别、有效缝洞储层表征、流体性质判别和井旁隐蔽缝洞储层评价。针对上述难题, 提出基于岩心刻度成像测井, 明确不同岩相关键图像特征, 形成在岩心约束下的测井岩相识别方法, 同时深入分析有效缝洞储层典型响应特征, 建立裂缝、溶蚀孔洞识别和定量表征方法; 针对高阻背景地层, 通过阵列感应测井资料重新处理, 实现油基泥浆条件下储层流体性质的准确判别; 通过远探测横波成像技术实现井旁 3~50m 范围内隐蔽缝洞储层的识别, 拓展测井径向探测深度, 形成了以成像测井系列为主的深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价技术体系, 由此反映中国深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价技术近年来的创新与发展。

关键词: 深层碳酸盐岩储层; 岩性扫描测井; 电成像测井; 阵列感应测井; 远探测声波测井; 测井评价

中图分类号: P631

收稿日期: 2025-03-21

Progress on key technologies for logging evaluation of deep and ultra-deep carbonate reservoirs

Wu Hongliang¹, Lai Qiang², Feng Zhou¹, Xin Yi³, Li Chaoliu¹, Liu Peng¹, Li Yusheng¹, Tian Han¹

- 1、Research Institute of Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China
- 2、Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China
- 3、Research Institute of PetroChina Tarim Oil Field Company, Korla 841000, China

Abstract: As oil and gas exploration extends into deep and ultra-deep areas, well logging is faced with great technical challenges such as ultra-high temperature and high pressure, harsh wellbore environment and low signal-to-noise ratios. Addressing difficulties in logging evaluation of deep-ultra-deep carbonate reservoir, this paper focuses on four key technical problems that restrict the

基金项目: 中国石油油气与新能源公司科技专项 (No.2023YQX10101); 国家自然科学基金重点项目 (No.U24B2029)

作者简介: 武宏亮 (1980-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事测井处理解释方法方面研究工作。ORCID:0009-0008-6468-7864.Email: wuhongliang@petrochina.com.cn

通讯作者: 田瀚 (1989-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事复杂储层测井处理解释方法研究。ORCID:0000-0003-0627-4929.Email:tianh_hz@petrochina.com.cn

exploration and development of deep and ultra-deep carbonate fields in China: lithology and lithofacies identification, characterization of effective fracture-cave reservoirs, fluid property identification and evaluation of subsurface fracture-cave reservoirs. In order to solve these problems, based on the core-calibrated image logging, the key image features corresponding to different rocks are identified, and the logging lithofacies identification method under the core constraint is formed. Based on in-depth analysis of typical logging response characteristics of effective fracture-cavity reservoirs, a method for identifying and quantitatively characterizing fractures and solution holes is established. For the high-resistivity background formation, the accurate identification of reservoir fluid properties under oil-based mud conditions is realized by re-processing the array induction logging data. The acoustic reflection imaging technology is used to identify the hidden fracture-cave reservoirs within 3~50m of the borehole, expanding the radial detection scope. Consequently, a technical framework for logging evaluation of deep/ultra-deep carbonate reservoirs—centered on imaging logging technologies—has been developed, which reflects the innovation and development of logging evaluation technology.

Key words: deep carbonate reservoir; lithology scanning logging; electrical imaging logging; array induction logging; acoustic reflection logging; log evaluation.

0 引言

随着油气勘探开发进程的不断推进, 深层-超深层逐渐成为油气资源勘探的重要现实领域(马永生等, 2011)。按照国内学者对碳酸盐岩油气藏的划分标准, “深层”是指目的层埋深在 4500~6000m, “超深层”是目的层埋深大于 6000m 的油气勘探领域(何治亮等, 2016; 王俊鹏等, 2023)。据第四轮资源评价结果, 在中国油气资源总量中, 埋深大于 4500m 的深层油气资源约占 40%(马永生等, 2020)。近年来, 中国先后在塔里木、四川以及鄂尔多斯盆地勘探发现塔河、普光、元坝、安岳和靖边等一批大型、超大型油气田, 实现了海相深层油气勘探的重大发现(李宁等, 2014; 庞雄奇等, 2020; 潘政屹等, 2022)。受益于油气勘探理论、工程技术的不断进步, 中国深层油气勘探的下限不断被刷新, 且不断获得新突破。2020 年, 塔里木盆地超深层寒武系盐下白云岩风险探井-LT1 井完钻, 井深 8882m, 井底温度 167°C, 压力 109MPa, 该井在 8200m 吾松格尔组试油, 获日产油 134 m³, 日产气 4.59×10⁴ m³ 的高产油流(杨海军等, 2020); 2020 年, 四川盆地德阳-安岳裂陷内部灯二台缘带风险探井-PT1 井完钻, 井深 6376m, 该井灯二段酸压测试, 产层中部温度 161.4°C, 压力 63.4MPa, 获日产气 121.98×10⁴m³ 的高产气流, 目前 PT1 井日产天然气仍稳定在 25×10⁴m³, 累计生产天然气超过 1 亿立方米(赵路子等, 2020)。这些勘探发现不仅进一步证实深层-超深层海相碳酸盐岩巨大的勘探潜力, 而且已然成为中国石油增储上产的重要阵地。

随着油气勘探不断向深层扩展, 与中浅层油气藏相比, 测井面临着两方面的重大挑战: 一是评价对象更复杂。随着埋深的增加, 地质对象表现出更致密、非均质性更强的特点。以塔里木盆地塔北奥陶系缝洞型储层为例, 超深缝洞型碳酸盐岩岩心分析平均孔隙度仅 1.28%, 平均渗透率为 0.79×10⁻³μm², 储层基质孔隙度极低, 但实际钻井过程中经常发生钻具放空和泥浆漏失情况, 岩心物性分析已不能代表储层发育段的油气储集性能, 缝洞储层平面上表现

出极强非均质性（朱光有等，2020）；二是井筒环境更恶劣。具体表现在：（一）、由于埋深较大，井筒中的测井仪器面临着超高地层温度和压力的考验。以四川盆地灯影组 X1 井为例，完钻井深为 7780m，井底温度为 159℃，井底压力 168MPa。这种高温高压环境会给测井资料采集带来巨大挑战；（二）、在油基泥浆钻井液的情况下，碳酸盐岩有效缝洞储层识别及流体性质准确评价存在困难。受油基泥浆和碳酸盐岩高阻地层综合影响，电阻率测井（阵列感应测井和油基泥浆电成像测井）对储层物性及含气性的反映不敏感，如何从这种低信噪比资料中获取关于储层和流体的信息存在技术挑战；（三）、深层-超深层碳酸盐岩储层基质孔隙度极低，储集空间以溶蚀缝洞为主，常规测井仪器探测深度一般小于 3m，如何准确识别和评价远离井筒的隐蔽缝洞储层存在困难（李宁等，2014）。因此，针对深层-超深层油气勘探过程中测井所遇到的技术挑战，除了亟需攻关耐高温高压测井仪器装备外，还需针对深层-超深层油气勘探地质对象的自身特点，发展和建立合适的测井评价方法，为中国深层-超深层碳酸盐岩油气藏的勘探开发提供有利技术支撑。

本文系统梳理了塔里木、四川和鄂尔多斯盆地典型探区深层-超深层海相碳酸盐岩储层特征，明确了中国深层-超深层油气勘探领域测井评价面临的关键难点。重点讨论了岩性岩相识别、有效缝洞储层识别与定量表征、流体性质判别和井旁隐蔽缝洞储层评价等目前制约中国深层-超深层碳酸盐岩勘探开发的几项关键技术的最新进展，由此反映中国深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价技术近年来的创新与发展。

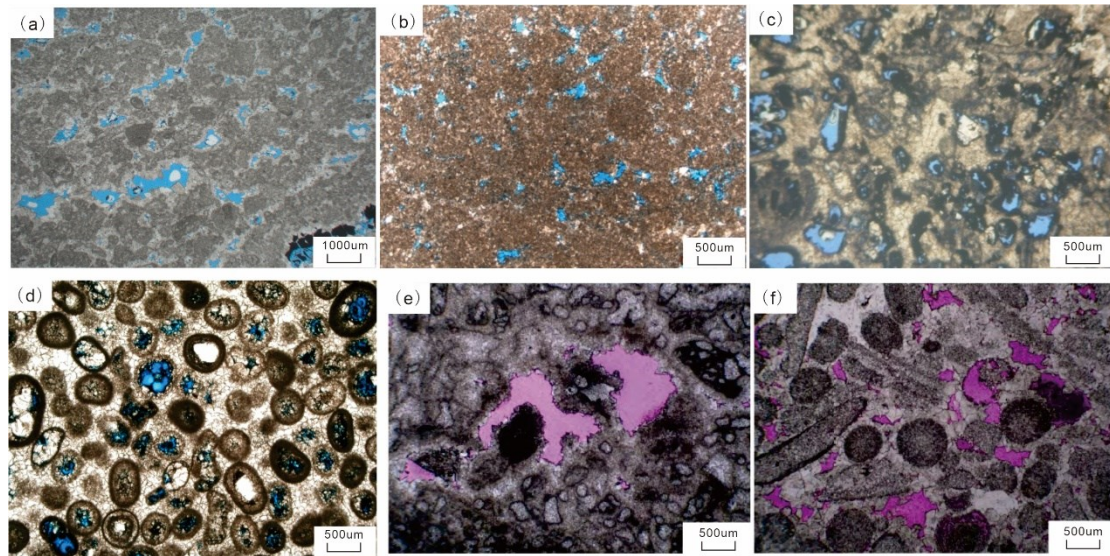
1 测井评价面临的挑战

中国深层-超深层碳酸盐岩储层地层时代老，埋藏深，经历了复杂的构造演化和变形构造及油气藏的破坏调整作用（何治亮等，2016）。这就决定了中国深层碳酸盐岩储层 90%以上都不是常规孔隙性储层，而是非均质性极强的礁滩、岩溶风化壳和低孔低渗致密灰岩白云岩等复杂碳酸盐岩储层（李宁等，2014）。复杂的岩性岩相、储集空间、孔隙结构和流体分布特征，决定了深层碳酸盐岩油气勘探开发对测井评价技术有着特定的需求。笔者针对国内塔里木、四川和鄂尔多斯三大盆地的深层-超深层碳酸盐岩储层测井评价所遇到的难题行了梳理和总结。

1.1 岩性岩相复杂

国内外各地区的研究实例表明，规模性碳酸盐岩储层的分布大多表现出相控特征。原始高能相带和白云岩化作用是优质储层发育的基础（何治亮等，2021），如四川盆地震旦系灯影组藻白云岩储层、寒武系龙王庙组颗粒滩白云岩储层、二叠系长兴组生屑白云岩储层、三叠系飞仙关组鲕粒白云岩储层和塔里木盆地塔中地区良里塔格组藻礁白云岩和颗粒白云岩储层等（图 1 所示）（沈安江等，2015）。虽说深层-超深层碳酸盐岩储层岩性（矿物成分）不如非常规油气（页岩油、页岩气）的泥页岩复杂（赵贤正等，2022），通常矿物类型不超过 4 种，主要以白云岩、灰岩为主，在测井资料质量好的情况下，利用常规测井最优化处理就

能得到相对准确的岩性剖面，但其岩相种类较多，且难以准确识别。以四川盆地灯影组四段（简称“灯四段”）为例，虽说灯四段地层整体以白云岩为主，但发育有泥-粉晶白云岩、藻砂屑白云岩、藻凝块白云岩、藻叠层白云岩、藻纹层白云岩、泥质白云岩和硅质白云岩等不同岩相类型，其中与微生物丘滩体建造密切相关的藻凝块白云岩、藻叠层白云岩和藻砂屑白云岩是主要储集岩类（田瀚等，2020；赵东方等，2022；宋泽章等，2023）。岩相类型不仅反映着地层的沉积微相特征，而且与储层物性好坏密切联系，准确的岩相识别对储层评价和地质认识意义重大。



（a）藻凝块白云岩，藻间溶孔，震旦系灯影组，磨溪 105 井，铸体薄片；（b）颗粒白云岩，粒间溶孔，寒武系龙王庙组，磨溪 17 井，铸体薄片；（c）生屑白云岩，生物体腔孔，上二叠统长兴组，高石 001-X21 井，铸体薄片；（d）鲕粒白云岩，粒内溶孔，下三叠统飞仙关组，龙 16 井，铸体薄片；（e）藻礁白云岩，藻格架孔，下寒武统，方 1 井，铸体薄片；（f）颗粒白云岩，粒间孔和鲕模孔，中寒武统，牙哈 7X-1 井，铸体薄片

图 1 中国不同盆地典型碳酸盐岩储层岩心薄片

Fig.1 Typical carbonate reservoir core slices in different basins of China

1.2 有效储层识别与表征难度大

中国深层-超深层碳酸盐岩储层基质孔隙度低，储集空间主要为在后期成岩改造作用下所形成的次生溶蚀孔洞和裂缝。不同盆地碳酸盐岩地层由于经历的成岩作用阶段和强度不同，所形成的储集空间类型也存在差异。如塔里木盆地奥陶系，储集空间主要为受断裂带控制的洞穴、裂缝和孔洞，而四川盆地震旦系灯影组，储集空间以孔隙、孔洞为主，裂缝相对不发育（李建忠等，2021）。依据储集空间的不同，碳酸盐岩储层通常划分为裂缝型、裂缝-孔隙型、孔洞型、孔隙-孔洞型、裂缝-孔洞型和洞穴型（田瀚等，2015）。不同储集空间对储层的储集和渗流能力贡献不同，如裂缝虽然能显著改善储层的渗流能力，但是对储集能力的提高作用有限；而孤立溶蚀孔洞则刚好相反，虽然有效增加了储集能力，但对储层整体渗流能力贡献相对较小（田瀚等，2019），因此，缝洞的识别与评价对储层有效性判别意义重大。

为了准确识别储层类型，学者们通过研究，总结了不同储层类型的典型测井响应规律。如裂缝型储层，在裂缝发育段，电阻率值会明显“降低”，若为低角度裂缝时，电阻率曲线常呈“尖刺”状，声波时差曲线也会出现“锯齿状”波动；若为高角度裂缝时，电阻率曲线形态相对平缓，而且深浅侧向一般呈正差异，三孔隙度曲线基本无明显反映（张尚华等，2011），因此，基于电阻率曲线的变化特征，不少学者也建立了裂缝倾角和裂缝孔隙度的计算方法；对于孔洞型储层，三孔隙度曲线一般均会有一定响应，其中以密度曲线反应最为灵敏，电阻率曲线相对围岩有明显降低；对于裂缝-孔洞型储层，其相当于裂缝型和孔洞型的测井响应特征的叠加，电阻率和三孔隙度曲线都有明显变化；对于未充填或半充填的洞穴型储层，测井响应特征表现为明显的“低密度、高声波时差和高补偿中子”，井径明显增大，且在钻井过程中会发生放空、漏失现象（田瀚等，2015）。成像测井由于具有高分辨率和图像显示的特性，对于裂缝和溶蚀孔洞的识别具有明显优势。在水基泥浆条件下，高导缝和溶蚀孔洞在电成像图中常呈黑色正弦状曲线和暗色斑状特征，基于成像图的直观观察，了解储层段缝洞发育情况，再结合成像图像处理，提取图中暗色区域，可以获得图像的“面孔率”，以此定量表征缝洞的发育程度。这些方法手段在一定程度上为储层类型的识别与表征提供了技术支撑，但是评价精度有待进一步提高，其核心在于如何准确识别有效的缝洞储层。如常规测井，虽然可以计算出储层物性，但无法区分储层中裂缝和溶蚀孔洞的贡献；成像测井虽然能直观识别缝洞，但是并非所有的暗色部分都代表着有效缝洞空间，图 2 为四川盆地 X2 井配套开展的水基和油基泥浆条件下的电成像测井测量结果，图 2(a) 左边为水基泥浆下储层段 FMI（Formation MicroScanner Image）图像，右边为油基泥浆条件下 NGI（Nonconductive-mud Geological Imager）图像。图中 7750~7752m 的 FMI 图像上见明显暗色正弦曲线，发育高角度裂缝，但对应 NGI 图像同样为暗色正弦曲线，由于裂缝在 NGI 图像上应该表现为亮色正弦曲线（油基泥浆相对不导电，其侵入裂缝后，裂缝应为亮色特征），表明该裂缝被低阻物质充填，并非有效裂缝，这从 7750.8m 处的层面特征得到证实，FMI 与 NGI 图像上均为暗色水平线状特征；图 2(b) 中左侧 FMI 图像上可见明显暗色斑状溶蚀孔洞，对应右侧 NGI 图像上为亮色斑状特征，表明该溶蚀孔洞为有效储集空间，因此，简单依据 FMI 图像特征有时难以对裂缝的有效性做出准确评价。如何正确解译成像图中暗色部分的真实地质含义直接影响对储层的认识和评价。

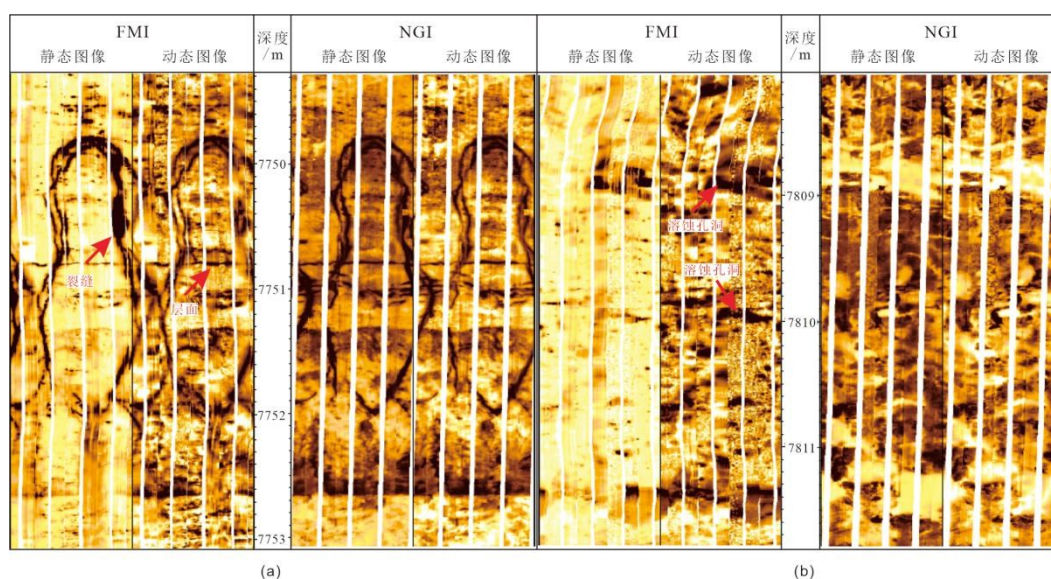


图 2 X2 井储层段 FMI 和 NGI 图像特征

Fig.2 FMI and NGI image characteristics of well X2 reservoir section

1.3 流体性质识别难度大

随着勘探不断向深层拓展，受埋深、高温高压和复杂地层等因素原因，为了确保钻井质量，越来越多的深层探井采用油基泥浆钻井液。油基泥浆钻井液相比水基泥浆钻井液，能有效保护井壁稳定，同时具有润滑性、抗高温和对油气层无损害等多种优点，但对电阻率测井影响巨大。常规侧向电阻率测井和电成像测井（FMI）等以直流电为基础的测井系列在油基泥浆钻井液的井筒中无法正常使用。

感应测井虽然能解决油基泥浆条件下电阻率测量的问题，但是其使用条件苛刻，且处理解释方法尚不成熟，尤其是在高阻地层中。以阿特拉斯 HDIL 为例，其电阻率测量范围在 $0.2\sim 2000\ \Omega\cdot\text{m}$ 的地层，在深层高阻碳酸盐岩地层中存在明显不适用性。如图 3 所示，对于高阻地层段，感应测井电阻率测量最大值限幅在 $2000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，但实际地层电阻率远超过 $2000\ \Omega\cdot\text{m}$ ；其次，感应测井在高阻碳酸盐岩地层中，纵向分辨率不如双侧向和阵列侧向电阻率高，X3 井 7824~7829m 井段，双侧向和阵列侧向电阻率曲线纵向分辨率明显高于感应测井；最后，基于传统软件聚焦处理方法得到的不同探测深度曲线彼此完全重合（李潮流等，2022），这对利用侵入特性判断储层流体性质造成巨大困扰。因此，如何结合实际情况，充分发挥感应测井在油基泥浆条件下的深层高阻碳酸盐岩地层中的应用是目前亟待解决的问题。

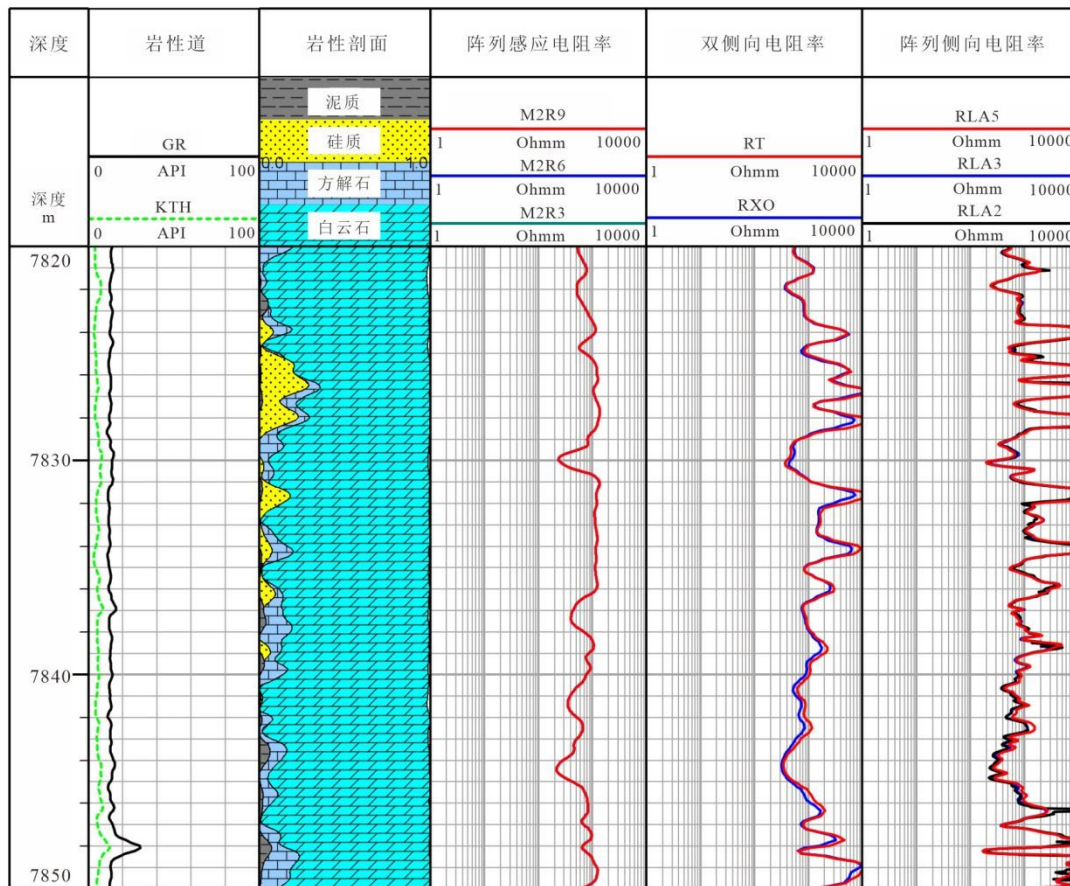


图 3 X3 井阵列感应、双侧向和阵列侧向电阻率对比

Fig.3 Array induction, dual lateral and array lateral resistivity comparison of well X3

1.4 井旁隐蔽缝洞储层识别难度大

不同测井系列的探测范围存在差异，目前常见测井仪器（常规测井、电成像、阵列声波、元素测井和核磁共振测井）的探测深度一般小于 3m（李宁等，2014），如电成像测井 FMI 探测深度为 2.54cm，放射性测井（补偿中子、补偿密度、伽马能谱）探测深度一般在 10~30cm，阵列声波 DSI 探测深度在 22.86cm，侧向和阵列电阻率测井探测深度相对较深，但也不超过 3m。测井工作者正是综合利用不同测井资料所反映出的地层特性来间接认识和评价地层，但正是因为探测范围有限，导致测井所评价的地层有时并非“真实”地层情况，尤其是在非均质性极强的碳酸盐岩地层中。

深层-超深层碳酸盐岩储层主要储集空间为后期成岩作用所形成的溶蚀缝洞，与孔隙型碳酸盐岩储层相比，缝洞型储层具有极强的非均质性，这就会出现“井筒内无储层，井外储层发育”的现象，传统有限探测深度的测井技术对此类隐蔽性储层就显得无能为力。如塔里木盆地塔中 X4 井，从常规测井来看，良里塔格组目的井段 5640~5690m 储层不发育，整体表现为致密，但是针对该井段侧钻酸压，5mm 油嘴，获产油 150 m³/d，产气 9.1×10⁴ m³/d 的高产油气流，试油结果表明井外储层发育。如何准确识别和评价这类井旁隐蔽储层（即“井筒内无储层，井外发育储层”），对于深层碳酸盐岩领域意义重大，这不仅影响着该井的试

油选层，还关乎着对该领域的地质认识。

远探测声波测井技术的产生为井周数米到数十米范围内的地质构造及地质体的识别提供了强有力的技术手段，改变了传统测井技术“一孔之见”和地震“雾里看花”的不足（唐晓明等，2013）。从远探测声波测井技术的发展来看，目前主要单极纵波法和偶极横波法2种，其中单极纵波法是通过接收从井外地质体反射回来的纵波来确定地质体位置，该方法虽然有一定应用效果，但是其缺点是无法确定井外地质体的方位；偶极横波法则是利用偶极声波探测仪发射和接收地层反射信号，通过偏移成像获得井旁地质体的发育情况，由于偶极子声源的指向具有方向性，所以采用四分量的偶极发射和接收，可以确定反射体的位置和方位，较单极纵波法具有明显优越性（Tang *et al.*, 2004；武宏亮等，2020）。由于远探测声波测井主要是利用反射波信号来研究井外地质体，而反射波信号相比沿井传播的滑行波要小很多（ $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 的量级），因此如何准确获取来自地层深部的微弱反射信号是面临的最大问题。

2 测井评价技术新进展

针对深层-超深层碳酸盐岩领域所遇到的测井评价难点，研究团队通过技术攻关，形成了配套的资料处理与评价方法体系，旨在为深层碳酸盐岩储层评价提供测井技术支撑。

2.1 电成像测井的岩相识别技术

微电阻率成像测井是目前已知测井系列中纵向分辨率最高的，理论上可达 5mm，是岩石宏观结构评价最有效的测井手段（田瀚等，2023）。由于常规测井的测量结果主要是岩石矿物成分、孔隙空间大小及流体性质的综合响应，对岩石结构特征不敏感，尤其是在成岩改造作用强烈的国内深层-超深层碳酸盐岩地层中。相比常规测井，电成像测井具有明显的分辨率和直观性优势，为精细岩相识别提供了方法思路（田瀚等，2020）。

碳酸盐岩岩相识别属于测井相分析范畴，其核心在于建立测井相与岩相之间的对应关系。电成像测井资料经过处理后得到动、静态图像，其中静态图像颜色亮暗变化是地层电阻率值高低的表现，一定程度上反映岩性的差异，动态图像结构的差异则是由沉积环境和成岩作用综合导致，间接反映地层岩石结构特征。成像测井相正是利用动、静态图像的颜色和结构变化来反映岩性的差异。

岩心刻度测井是建立测井相与岩相关系的基础，是赋予测井相地质意义的重要环节。一般思路是遵循岩心为第一性参照标准，在详细岩心观察和描述的基础上，通过岩心标定测井，明确不同岩相的典型成像特征。这不仅要求分析的岩心资料能够覆盖各种岩相类型，而且需要研究人员对研究区的地质背景有所了解，只有这样才能降低测井相的多解性。在明确不同岩相的成像特征后，从图像的颜色、结构等方面入手，梳理总结典型的成像模式。如颜色方面，可以划分为暗色、黄色和白色；结构方面，可以划分为块状、斑状、层状和条带状等。不同研究区、不同层系划分标准不尽相同，但需遵循可区分性和可操作性。

利用电成像测井开展岩相识别，首先需在大量岩心标定测井的基础上，明确不同岩相的

典型成像模式，建立岩相与成像测井相对应关系。图 4 为岩心刻度成像测井实例，基于成像测井高分辨率和高直观性优势，成像测井图像与岩心具有很好对应关系，不同岩性对应的图像特征存在明显差异，这是成像测井可以用于岩相精细识别的基础。图 5 为通过大量岩心刻度成像后，系统梳理总结的四川盆地高石梯-磨溪地区灯影组四段典型岩相成像图版，如藻砂屑云岩表现为均匀暗色斑状特征；藻叠层云岩为暗色层状特征，层面不规则，呈“点线”组合形式；藻凝块云岩虽然也是黑色斑状特征，但与藻砂屑云岩不同的是，其斑点呈不规则分布，且暗斑尺度大小不一，通过分析不同岩相的成像特征，建立相应岩相-成像测井相响应模式。其次，在明确不同岩相的成像模式后，提取对应图像的标志性特征，如图像的颜色及灰度、图中暗斑尺寸、数量及形态等，作为岩相识别的划分依据。结合图像处理技术，通过图像分割和特征提取等手段，得到图像面孔率、灰度、圆度等特征参数，实现从定性分析到定量表征。最后，针对关键井，在岩心精描的基础上，明确不同岩相对应特征参数范围，建立岩相划分标准。建立的岩相划分标准正确与否，需要利用已知井进行验证，若划分方法不合适，需对特征参数或阈值进行修正，最终形成适合研究区的岩相识别方法和标准。

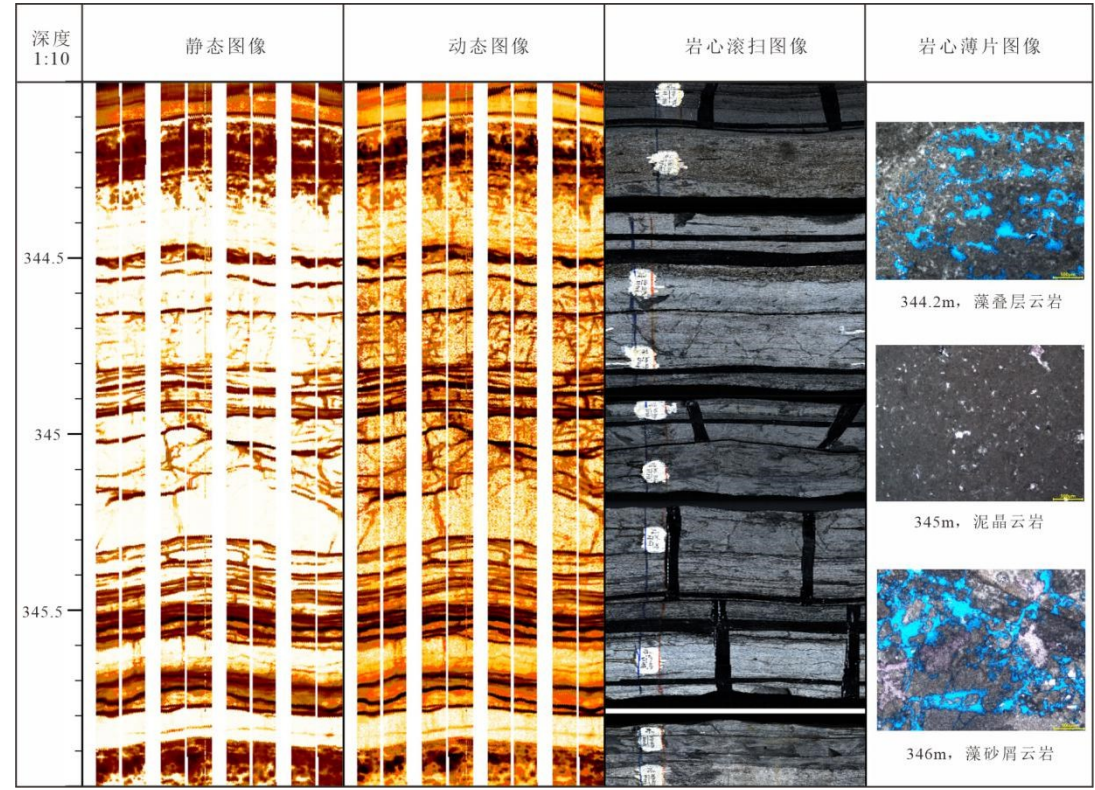


图 4 岩心刻度成像测井
Fig.4 Core calibration imaging logging

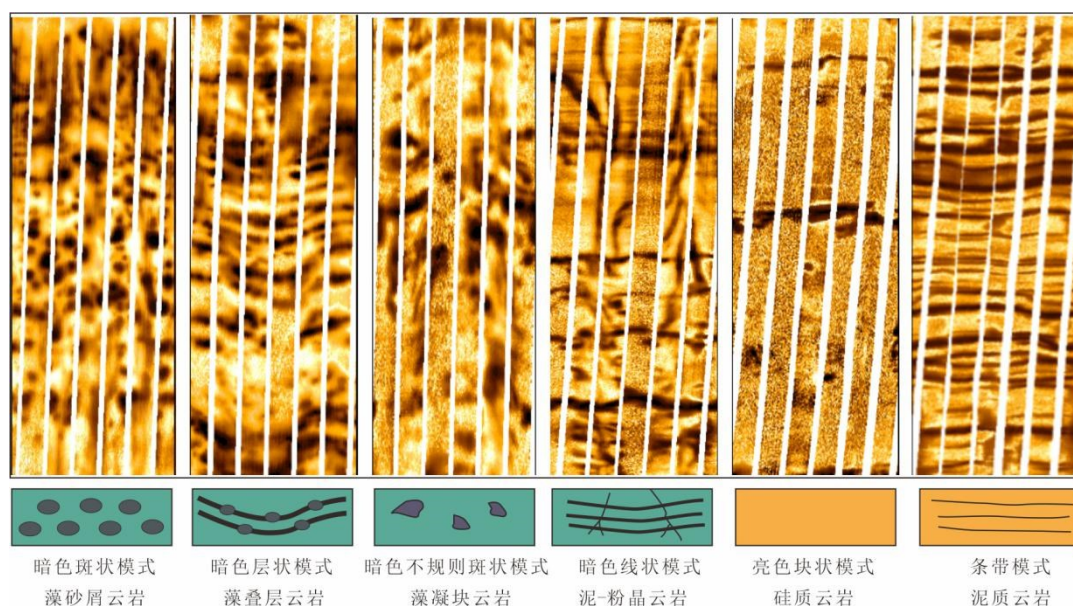


图 5 四川盆地灯影组四段典型岩相成像图版

Fig.5 Typical lithographic plate of the four members of Dengying Formation, Sichuan Basin

图 6 为四川盆地 X5 井成像测井岩相识别结果，目的层是灯影组四段，第八道为基于成像测井岩相识别方法所识别的岩相类型，第九道为对应岩相描述，第十道为实际岩心描述结果。对比发现，基于成像测井识别的岩相类型与实际岩心描述吻合度较好，虽说目的层段岩石矿物成分差异不大，均以白云岩为主，但成像图像特征却存在明显变化（图 6 第七道），而这些成像测井特征正代表着不同的岩石类型。再结合计算得到的物性曲线，即可明确目的层段的有利岩相类型，其中，藻砂屑云岩、藻凝块云岩是 X5 井灯四段优质储层发育的主要岩石类型。

成像测井资料包含着丰富的地质信息，是解决非取心井岩性岩相识别的重要手段，能有效弥补常规测井曲线对深层-超深层碳酸盐岩领域岩相识别能力弱的短板。充分利用成像测井在图像颜色和结构上的优势，结合岩心刻度，在明确图像变化特征的地质含义基础上，实现岩相的精细识别。目前，电成像测井已成为深层-超深层领域必测测井系列，如何深入挖掘内在地质信息是客观认识地下油气藏的关键。

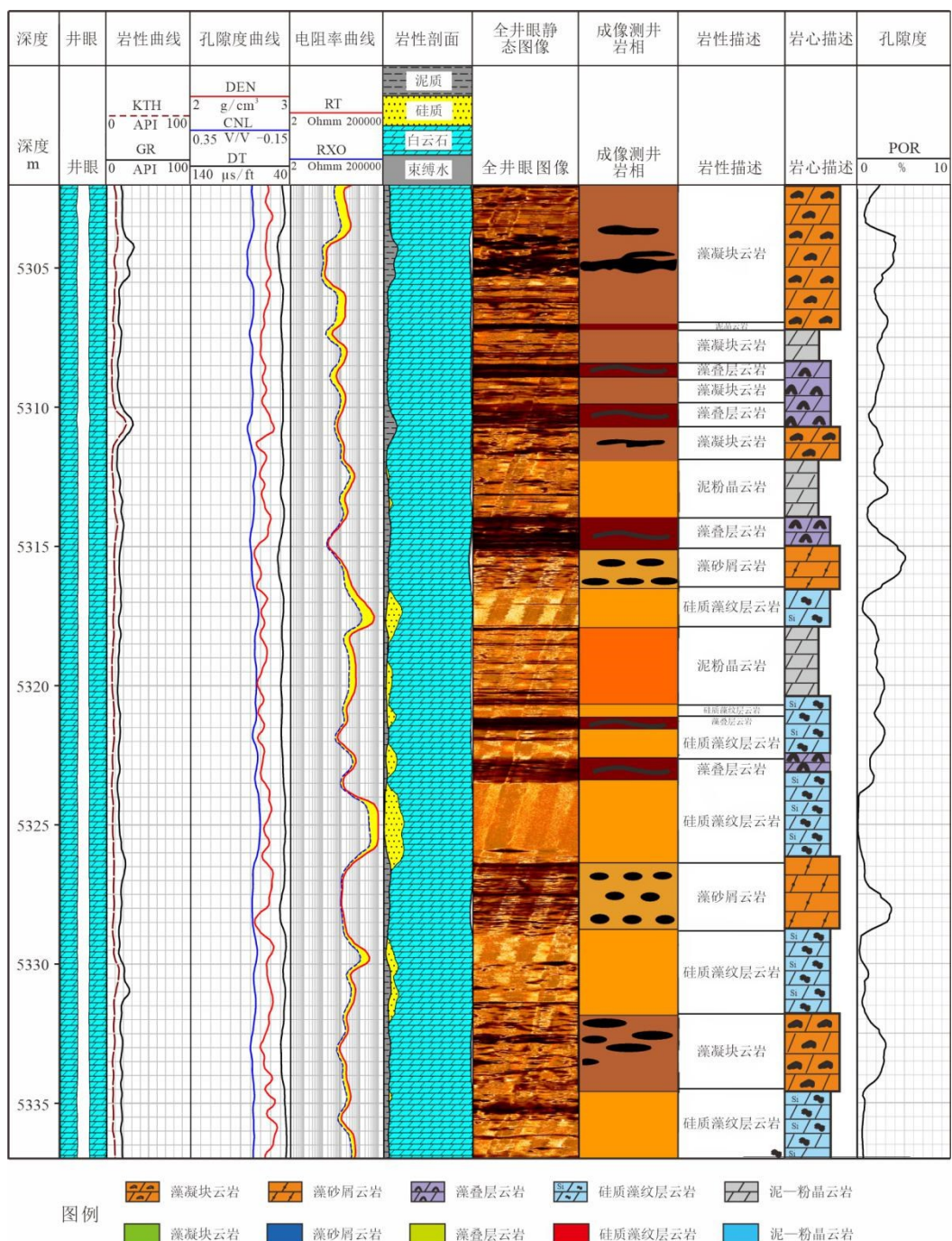


图 6 四川盆地 X5 井成像测井岩相识别结果

Fig.6 Lithofacies identification results of imaging logging in well X5, Sichuan Basin

2.2 有效储层识别与表征技术

电成像测井作为缝洞碳酸盐岩储层识别与评价最为重要的测井手段已得到广泛应用。为了明确裂缝、溶蚀孔洞等储集体的测井响应特征，国内开展过模拟井和科探井（如塔里木盆地 TK1 井）的系统研究，旨在明确不同地质体的测井响应特征，为利用电成像测井准确识别缝洞储层提供依据。通过大量岩心-成像测井资料的对比分析，缝洞储层的成像特征已被大家所熟知，如裂缝在成像图上通常表现为正弦曲线特征，溶蚀孔洞为暗色斑状特征，等等。这些研究深化了人们对缝洞储层的认识，也为碳酸盐岩缝洞储层的勘探开发提供了重要支

撑。但是随着油气勘探程度的深入,发现传统成像测井缝洞认识与实际存在着一定差异,尤其是对有效缝洞储层的识别方面。如前述图 2 所示,从成像特征来看,FMI 成像图上是典型裂缝的响应特征,但是结合油基泥浆电成像测井 NGI 综合分析,发现该裂缝是无效裂缝,被低阻物质充填,因此,如何能准确识别和表征有效缝洞体,对缝洞储层有效性评价至关重要。

利用电成像测井识别有效缝洞储层的核心问题在于如何正确认识电成像图像(水基泥浆条件下)中暗色部分的地质含义。我们知道,电成像图像的亮暗本质上反映的是电阻率的高低,即,纽扣电极对应地层岩石电阻率值高,在成像图上就表现为白色,纽扣电极对应地层岩石电阻率值低,在成像图上就表现为暗色。传统的缝洞识别就是通过图像中暗色部分的分布特征来判断,如暗色斑状是溶蚀孔洞,暗色正弦状是有效裂缝,同时通过对这些暗色特征进行提取,实现定量表征。可以发现,准确识别有效缝洞储层的关键在于如何认识图像中暗色部分。勘探实际证实,电成像测井图像中暗色部分并非都是有效的缝洞储层,这些暗色部分可能是有效的溶蚀缝洞,也有可能是泥质充填、泥砾、层面、缝合线或黄铁矿等等。如何从图像中识别出真正反映有效缝洞储层的暗色部分显得尤为重要。

为了明确有效缝洞真实的成像测井响应特征,研究团队通过大量的岩心标定测井研究,系统总结了不同地质体的典型测井响应特征,尤其是那些暗色图像的地质体。如层面,通常表现为纵向规律分布,暗色部分与亮色部分呈“突变”接触,且暗色部分边界光滑,如图 7 中 5843~5844m,暗色曲线纵向规律展布,且形态一致;对于黄铁矿,由于其具有“电阻率低、密度大”的特点,在成像图上通常表现为暗色斑状,亮暗突变明显,常规测井上密度值偏大,元素测井计算的黄铁矿含量增多;对于泥砾或泥质充填缝洞,其与有效缝洞的差异在于伽马曲线表现出明显伽马值增大,如图 7 中 5841~5842m,伽马曲线有明显增大特征。综合常规和成像测井资料,认为有效缝洞主要表现为自然伽马值低,成像图中表现为亮色背景下不规则暗斑状或不连续线状,暗色周围呈“光晕”特点,而无效缝洞主要表现为暗色图像具有明显的规律性、一致性和旋回性。

基于上述有效缝洞识别规则,创新建立了成像测井缝洞自动提取及定量表征方法。首先,在常规动静态图像处理基础上,开展全井眼图像处理,实现图像满覆盖;其次,利用浅侧向电阻率对成像测井进行刻度,赋予图像亮暗绝对数值意义,而非相对大小,得到刻度后的成像图,如图 7 第五道所示;再次,利用基于阈值的图像分割方法将反映缝洞的图像分割出来,由于溶蚀孔洞通常表现为暗色斑状特征(低电阻),可以针对目标层段,通过寻找合适阈值(确定溶蚀孔洞对应的电导率下限值),把暗色部分从背景中分割出来,这种方法不仅将有效缝洞提取出来,同时将一些非有效缝洞的地质体分割出来,再利用人机交会方式,从提取的暗色图像中将那些层面、泥质条带、泥砾等非有效缝洞的地质体剔除,此时就需要借助前述有效缝洞的识别规则和评判标准,最大程度只保留有效缝洞的特征,如图 7 第七道所示;最后,利用数学算法计算得到相应孔洞参数,如面孔率、孔洞数量和大小等,实现溶蚀

孔洞量化表征，如图 7 第八道所示。

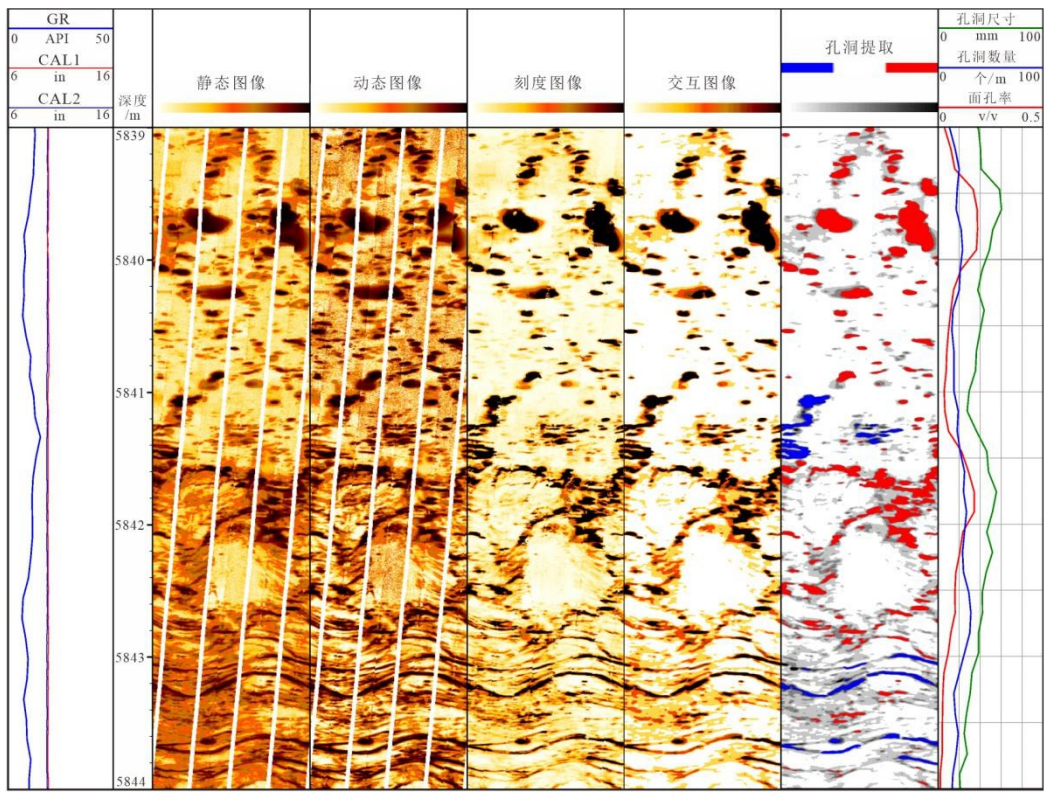


图 7 基于成像测井的溶蚀孔洞定量表征

Fig.7 Quantitative characterization of dissolution holes based on imaging logging

基于成像测井处理得到的缝洞参数（如面孔率）不仅可以定量表征溶蚀缝洞发育程度，还为准确计算储层物性提供了思路。受深部地层高温高压、强挤压应力综合影响，实际钻井过程中井筒状况复杂，井眼质量差，使得后续部分测井资料质量难以满足评价需求，尤其是贴靠井壁测量的密度测井曲线，如图 8 所示，密度测井曲线局部存在异常，与其它测井曲线匹配性差，密度测井曲线的失真导致准确评价储层物性面临挑战，虽说声波时差测井受井眼状况影响较小，但其主要反映岩石基质部分的物性情况，对于次生溶蚀孔洞反映不敏感。如图 8 第九道所示，利用声波时差计算的孔隙度比实测全直径岩心孔隙度明显偏低。针对这种情况，提出了一种常规测井与成像测井相结合的复杂井况下储层物性计算方法，即利用声波时差计算岩石的基质孔隙度，利用电成像测井提取的缝洞参数来表征岩石的次生孔洞孔隙度，两者相结合即为储层的总孔隙度（F.J.Lucia., 2011）。需要注意的是，基于成像测井得到的面孔率反映的是井壁二维平面上孔洞发育情况，无法完全替代地层孔洞孔隙度，但是两者之间存在正相关关系，此时可以利用研究区内井况良好的钻井，建立面孔率与次生孔洞孔隙度的线性关系，从而实现面孔率到次生孔洞孔隙度的转换。图 8 第八道为基于电成像测井处理得到的面孔率；图 8 第十道为采取上述方法最终得到的孔隙度与岩心分析孔隙度对比，可以发现，新方法计算的储层孔隙度与全直径岩心分析结果具有较好一致性，从而能更真实反映地层物性情况，不遗漏储层段。

在井眼状况不好的情况下，上述方法不失为一种评价缝洞储层物性的手段，但是在使用

时需注意如下几点：1、井眼状况不能对成像测井质量造成影响；2、如何利用成像测井准确获取缝洞参数，即面孔率计算的准确与否；3、不同电成像测井系列（FMI、MCI 和 XRMI）对于缝洞的反映存在差异，需针对不同成像系列建立相应的面孔率与孔洞孔隙度转换模型。

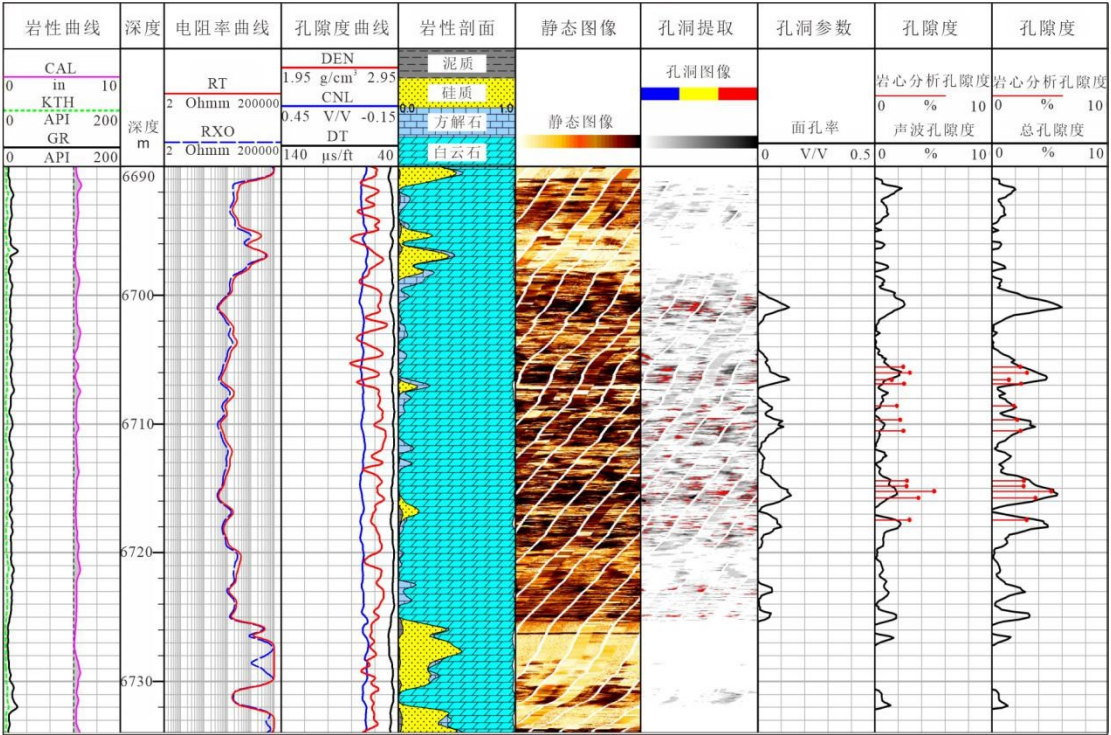


图 8 基于补偿处理后的储层孔隙度计算结果

Fig.8 The calculation results of reservoir porosity after compensation treatment

2.3 高阻背景下的阵列感应处理技术

随着勘探向深度地层进军，测量仪器面临的井筒环境越来越复杂，为了确保井筒安全和获得高质量测井资料，油基泥浆钻井液应用的越来越普遍。在油基泥浆条件下，裸眼井中只能采用阵列感应测井。阵列感应仪器采用多线圈系、多频率组合模式，可采集丰富的电阻率信息（李潮流等，2019）。以国内大量引起和应用的阵列感应测井仪 HDIL（High Definition Array Induction Log）为例，该仪器可以同时采集 8 种频率的实部和虚部，共 112 个信号，通过一系列的数据处理，得到具有固定纵向分辨率和给定径向探测深度的电阻率曲线（Beard *et al.*, 1996），利用提供的多种分辨率和探测深度的电阻率信息可为复杂油气层测井评价提供有效手段。

目前阵列感应测井在中-低阻地层得到广泛应用，相应资料处理和评价方法也较为成熟，但在高阻碳酸盐岩地层中面临诸多问题和挑战。首先，目前阵列感应测井测量范围为 0.2~2000 Ω·m，当地层电阻率值超过 2000Ω·m，软件聚焦后的阵列电阻率曲线呈平直状态，出现限幅，但从泥浆替换后测量的双侧向和阵列侧向电阻率来看，地层实际电阻率远超过 2000Ω·m（图 3），阵列感应电阻率无法反映地层真实电阻率值；其次，针对高阻地层的阵列感应测井资料处理方法尚不成熟，基于现有处理方法得到的阵列感应测井曲线无法用于储层流体性质评价，软聚焦处理得到的阵列感应曲线彼此完全重合（图 3），无法利用曲线相

对关系判断侵入情况，而实测双侧向和阵列侧向电阻率曲线在储层段可见明显差异特征，这对利用电阻率测井判断流体性质带来很大困扰。因此亟需针对高阻地层，建立合适的阵列感应测井资料处理方法，为阵列感应测井在流体识别方面提供支撑。

图 9 为一口四川盆地深层碳酸盐岩地层的油基泥浆钻井，从实测阵列感应原始电导率曲线来看，短源距的子阵列曲线 MSEC0、MSEC1 原始信号大段表现为负值异常（图 9 第二道），这是由于高阻致密地层电导率低，而阵列感应测井原始信号阈值为 $1\mu\text{V}$ ，当子阵列原始信号强度低于信号阈值时，在误差允许范围内，实际测量中会出现负值现象（尹中旭等，2020）。若按照传统软聚焦方法（七个子阵列电导率曲线均参与）进行处理，测量误差会进一步放大，导致合成曲线失真，出现感应电阻率曲线彼此重合（图 9 第七道）。为此，针对高阻地层阵列感应测井资料处理时，李潮流等认为由于短源距子阵列测量误差显著，在软聚焦信号合成时应该更多考虑长源距子阵列的贡献，在可能的情况下应摒弃短源距子阵列曲线，研究新的软聚焦处理算法，如剔除编号为 MSEC0 和 MSEC1 的子阵列曲线，从而避免异常曲线的误差传递给最终的输出结果，而对于其他子阵列部分存在负值异常地方（如编号为 MSEC2 电导率曲线局部仍存在负值），采用异常约束校正，强制让这些经过趋肤校正后的电导率结果不低于储层段的电导率下限 $C_{\min}$ ，从而保证后续聚焦处理曲线的合理性，最大程度确保处理结果能准确反映地层电阻率及其侵入特征（李潮流等，2019）。对于储层段电导率下限 $C_{\min}$ 可以利用 Archie 公式来获得，在已知孔隙度、岩电参数及地层水电阻率的情况下，假设储层完全饱含油气，此时计算的储层电阻率即为储层段理论电阻率上限（王嵩然等，2024）。图 9 最后一道为新处理结果，可以发现对于致密段，电阻率曲线表现为重合，而对于储层段，电阻率值差异得以体现。如 7805~7820m 储层段，新处理阵列电阻率曲线表现出明显“负差异”特点，结合电阻率值大小和曲线组合特征，综合认为该储层段含水可能性很高，最终也得到试油结论验证。

利用这种剔除短源距异常子阵列曲线，只保留正常子阵列曲线参与后续软聚焦处理的方法，虽然一定程度上牺牲了曲线纵向分辨率，但能将电阻率曲线的真实数值和彼此相对关系凸显出来，通过不同探测深度曲线的分异程度，判断流体侵入特征和渗流能力，这对利用电法测井判别储层流体性质至关重要。

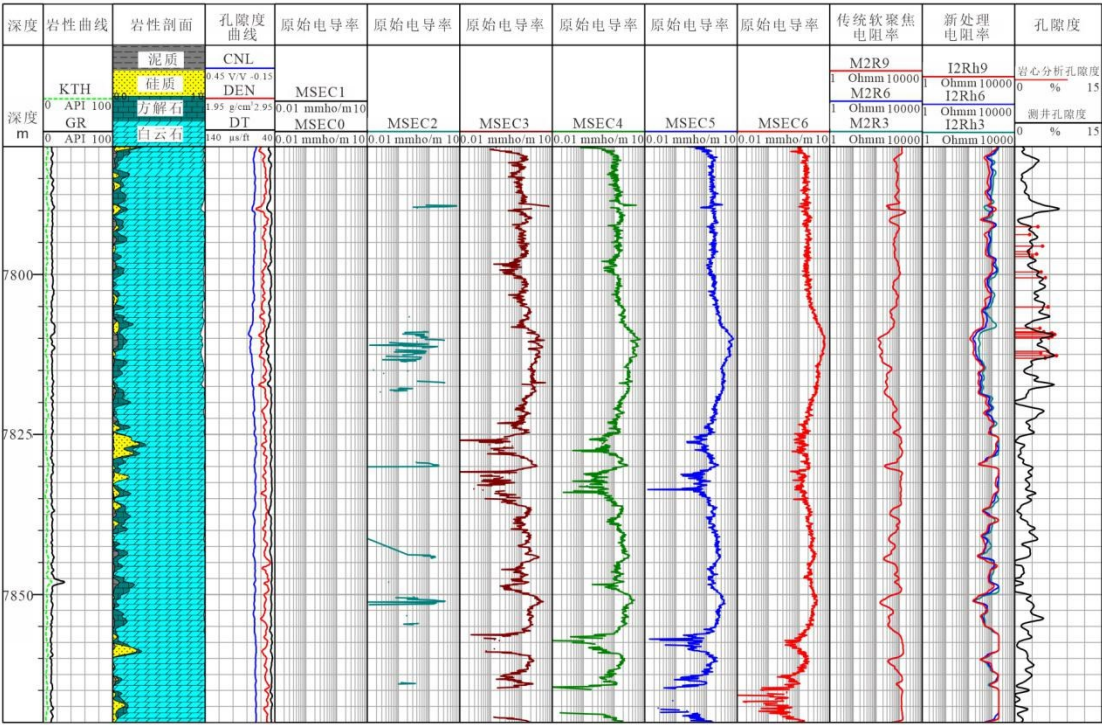


图 9 X6 井阵列感应测井资料处理结果

Fig.9 Data processing results of X6 well array induction logging

2.4 井旁缝洞储层识别技术

常规和成像系列测井资料常用于评价井筒附近储层发育情况(径向探测范围小于 3m)，而无法对远离井筒的隐蔽储层做出有效评价。由于碳酸盐岩储层非均质性极强，井筒附近储层不发育并不代表井外不发育储层，如何有效探测和评价井旁缝洞储层已成为测井研究的重要方向之一（李宁等，2024）。远探测声波测井技术的发展为解决这一难题提供了重要技术方法。远探测声波测井主要是利用反射波信息来识别井外反射体的位置、方位和形态，其对井外缝洞储层探测的基本原理类似地震勘探，当声波遇到裂缝、洞穴等波阻抗与地层存在明显差异的地质体时，将会以反射波形式回传到井筒被接收器所记录。目前远探测声波测井的径向探测深度大概在 3~50m，具体探测深度与测量仪器采集时间和地层特性有关，以碳酸盐岩地层为例，假设碳酸盐岩地层横波速度为 3300m/s，XMAC-F1 仪器采集时间是 25ms，此时远探测声波测井理论径向探测深度为 41.24m，若是页岩地层，页岩地层横波速度为 1500m/s 时，则探测深度仅为 18.75m。远探测声波测井可实现对井外缝洞储层的探测，从而有效弥补常规测井与地震之间的空白带。

偶极横波远探测声波测井是近些年发展起来的一种测井新方法（武宏亮等，2021），其主要利用偶极子声源激励横波的辐射声场特征，结合声波测井仪发射器与接收器的组合关系，获得偶极四分量波形（唐晓明等，2012），实现对井外不同方位反射体的识别，弥补了传统单极纵波远探测无法分辨井外反射体方位的缺陷。在实际井筒条件下，由于反射波的能量相比滑行波十分微弱，同时还受到不同类型噪声和多次波的干扰，如何从复杂波场环境中提取出有效反射波信号是关键，其关系到井外反射体的成像质量。研究团队通过多年技术攻

关，系统梳理总结了影响反射波提取精度的各类噪声，并深入探讨了不同噪声的产生机理、响应特征及针对性的消除方法，最终提出了一套反射波分布提取方法（图 10），在有效提取反射波信号后，通过偏移算法对井旁地质构造准确成像，从而明确反射体的空间位置（李宁等，2024）。

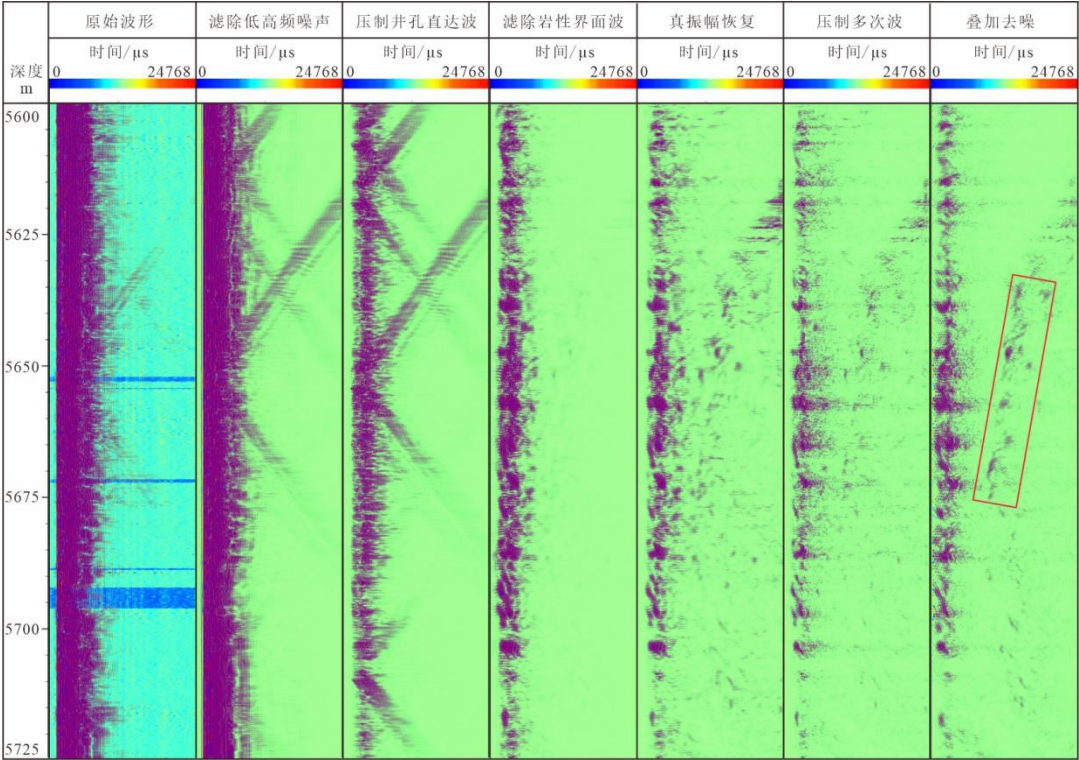


图 10 偶极横波远探测声波测井反射波分布提取方法（据李宁等）

Fig.10 Extraction method of reflection wave distribution in remote acoustic logging (according to Li Ning et al.)

偶极横波远探测声波测井(简称“远探测声波测井”)的出现让测井从以前的“一孔之见”变成“一孔远见”，其在非均质性强的缝洞型储层识别与评价方面发挥了重要作用，使得远离井筒的隐蔽缝洞储层得以发现，拓展了油气勘探领域。图 11 为塔里木盆地深层碳酸盐岩领域一口探井，从常规测井资料来看，5640~5690m 井段声波时差曲线几乎没有变化，呈“直杆”状，电阻率值较高且深浅侧向无明显差异，上述测井响应特征表明该井段井壁储层不发育，为干层；从远探测声波测井资料处理结果来看，在 5645~5680m 井外北偏东 60°方位，距离井筒约 15m 处发育一组高角度地质异常体，该异常体纵向高度可达 35m，结合区域地质认识，认为该地质异常体为井外缝洞储层响应，最终针对该异常体侧钻，通过酸压改造，获得日产油 150 立方米，日产气 91386 立方米高产油气层，验证了远探测声波测井对井旁隐蔽储层的正确认识。目前，该技术在塔里木油田得到广泛应用，有效助力井旁隐蔽缝洞储层的识别与评价。

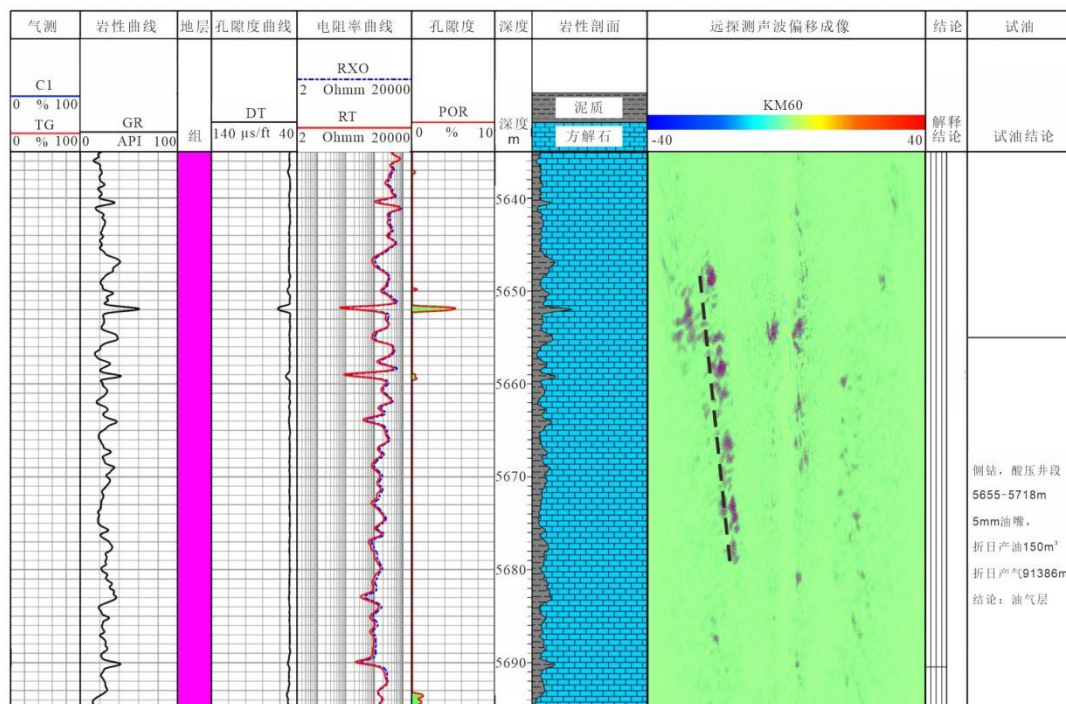


图 11 塔里木盆地 X7 井远探测声波处理结果（据李宁等）

Fig.11 Acoustic processing results of remote detection in well X7, Tarim Basin (according to Li Ning et al.)

虽说远探测声波测井在实际应用中表现出良好效果，但仍面临诸多挑战。首先，远探测声波测井主要利用反射波信息来识别井外地质体，理论上对近水平发育的地质体无法有效反映，但在实际应用中，层状分布的储集层在远探测声波仍可见成像信号，针对这类地质体在远探测声波测井上的响应特征和内在响应机理需深入研究；其次，远探测声波测井反映井外异常地质体的关键在于该地质体与周围地层存在明显声阻抗差异，但目前对于声阻抗差异具体阈值尚不清楚，同时，所识别出的异常体所代表的地质含义无法明确，即到底是缝洞储层还是其它异常地质现象，还需结合研究区地质背景和其它测井信息综合判断；最后，现有远探测声波测井处理方法针对大尺度、高角度且与围岩存在明显声阻抗差异的井外反射体具有很好识别效果，如塔里木盆地奥陶系“断溶体”缝洞碳酸盐岩储层。对于由小尺度组成、近水平分布、与围岩声阻抗差异较小的地质体应用效果不佳，如四川盆地震旦系灯影组的白云岩储层，针对这类储层，如何改进现有处理方法及流程仍需攻关，同时还需开展配套正演数值模拟，丰富不同类型储层的正演图版库，指导后续解释评价。

不可否认，远探测声波测井的出现不仅拓展了测井探测范围，同时还为井震结合提供了新思路。传统井震结合多表现为利用常规测井提供的密度和声波时差资料，得到地层反射系数，再结合地震子波，得到井旁地震道，实现测井与地震的结合（Russell *et al.*, 1991），但远探测声波测井为井震结合提供了新方向，这是因为远探测声波测井与地震所探测的均为反射波信号，如何实现两者的融合或有助于拓展井震结合的深度（李宁等，2024）。

3 结论

(1) 深层-超深层碳酸盐岩领域，测井面临着复杂井筒环境、复杂孔隙结构和低信噪比的挑战，充分挖掘成像测井系列资料的有用地质信息是准确客观认识地下油气藏的关键。

(2) 充分发挥电成像测井高分辨率和高直观性优势，在岩心刻度成像的基础上，利用电成像图像特征识别复杂岩相类型；利用有效缝洞储层成像响应特征和图像处理技术，实现缝洞储层的准确识别和量化表征。

(3) 利用阵列感应新处理方法，可以解决高阻地层背景下储层段不同探测深度阵列曲线重合问题，提高了利用电阻率曲线识别流体性质的能力；利用偶极横波远探测声波测井可以在常规测井探测不到而误认为没有储层的井旁发现隐蔽高产油气层，从而实现从井筒到井旁 0~50m 纵深范围内的储层识别与评价。

(4) 基于成像测井系列形成的技术方法为深层-超深层碳酸盐岩领域的储层评价提供了重要技术手段，形成了具有中国特色的深层-超深层复杂碳酸盐岩评价技术体系，支撑着深层-超深层领域的勘探发现与突破。

References

- Beard, D.L., Zhou, Q., Bigelow, L., 1996. A new, fully digital, full-spectrum induction device for determining accurate resistivity with enhanced diagnostics and data integrity verification[C]. SPWLA 37th Annual Logging Symposium Transaction. New Orleans, Louisiana: SPWLA.
- Lucia, F. J., 2011. Carbonate Reservoir Characterization [M].Petroleum Industry Press.
- He, Z. L., Jin, X. H., Wo, Y. J., et al., 2016. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China [J].China Petroleum Exploration, 21 (1) : 3-14.
- He, Z. L., Ma, Y. S., Zhu, D. Y., et al., 2021. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 42(3): 533-546.
- Li, N., Xiao, C.W., Wu, L.H., et al., 2014. The innovation and development of log evaluation for complex carbonate reservoir in China [J]. Well Logging Technology, 38 (1) : 1-10.
- Li, N., Liu, P., Wu, H. L., et al., 2024. Development and prospect of acoustic reflection imaging logging processing and interpretation method[J].Petroleum Exploration and Development, 51 (4) : 731-742.
- Li, J.Z., Tao, X.W., Bai, B., et al., 2021. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 48 (1) : 52-67.
- Li, C. L., Wu, H. L., Li, X., et al., 2022. A new data processing method of array induction logging for incline electrical anisotropic formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 43 (10) : 1439-1449.
- Ma, Y. S., Cai, X. Y., Zhao, P. R., 2011. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir [J]. Earth Science Frontiers, 18 (4) : 181-192.
- Ma, Y. S., Li, M. W., Cai, X. Y., et al., 2020. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China:Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 41 (4) : 655-683.
- Pang, X. Q., Lin, H. X., Zheng, D. Y., et al., 2020. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China[J]. Journal of Geomechanics, 26 (5) : 673-695.
- Pan, Z. Y., Xu, L., Zhang, L., et al., 2022. Global exploration status and development characteristics of deep carbonate gas reservoirs [J].Journal of Shengli College China University of Petroleum, 36 (3) : 1-12.

- Shen, A. J., Zhao, W. Z., Hu, A. P., et al., 2015. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (5) : 545-554.
- Song, Z. Z., Ge, B. F., Wang, W. Z., et al., 2023. Quantitative Characterization of Ultra-Deep Paleo-Oil Reservoirs and Its Indication for Deep Gas Accumulation: A Case Study on the Dengying Formation, the North Slope of Central Sichuan Paleo-Uplift [J]. *Earth Science*, 48 (2) : 517-532.
- Russell, B., Toksöz, M. N., 1991. Comparison of poststack seismic inversion methods[R]. SEG 1991-0876.
- Tang, X. M., 2004. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement [J]. *Geophysics*, 69 (6) : 1378-1386.
- Tian, H., Zhang, J. Y., Li, C., et al., 2020. The Application of Image Logging in the Identification of Microbialite Facies in Dengying Formation, Sichuan Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 42 (5) : 75-85.
- Tian, H., Yang, M., 2015. The logging evaluation methods for fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39 (3) : 545-552.
- Tian, H., Shen, A. J., Zhang, J. Y., et al., 2019. New calculation method of cementation exponent m for crack-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62 (6) : 2276-2285.
- Tian, H., Yan, W. L., Wu, H. L., et al., 2023. Logging quantitative identification method for lithofacies of continental shale oil [J]. *Progress in Geophysics*, 38 (5) : 2122-2134.
- Tang, X. M., Wei, Z. T., Su, Y. D., et al., 2013. A review on the progress and application of dipole acoustic reflection imaging technology [J]. *Well Logging Technology*, 37(4): 333-340.
- Tang, X. M., Wei, Z. T., 2012. Significant progress of acoustic logging technology: Remote acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 31(1): 10-17.
- Wu, H. L., Liu, P., Wang, K. W., et al., 2020. A method for recovery of reflection amplitude in dipole acoustic reflection imaging [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(4): 457-466.
- Wu, H. L., Liu, P., Wu, L. H., et al., 2021. Extraction method of reflected S-wave near borehole in carbonate fracture-cavity reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42(10): 1337-1345.
- Wang, J. P., Zeng, L. B., Zhou, L., et al., 2023. Development Model of Natural Fractures in Ultra-Deep Sandstone Reservoirs with Low Porosity in Kelasu Tectonic Belt, Tarim Basin. *Earth Science*, 48 (7) : 2520-2534.
- Wang, S. R., Li, C. L., Liu, Y. M., et al., 2024. Analysis of influence factors and method of

- correction in high resistivity formation by a high definition induction log[J]. Petroleum Science Bulletin, 9(1):50-61.
- Yang, H. J., Chen, Y. Q., Tian, J., et al., 2020. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 25 (2) : 62-72.
- Yin, Z. X., Wang, Y. X., Xie, B., et al., 2020. Applicability analysis and resistivity correction method of oil-base mud well array induction logging in carbonate rock formation[C].Annual meeting of Chinese Geoscience Union, Chongqing, 3735-3738.
- Zhao, L. Z., Wang, Z. C., Yang, Y., et al., 2020. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 25 (3) : 1-12.
- Zhu, G. Y., Sun, C. H., Zhao, B., et al., 2020. Formation, evaluation technology and preservation lower limit of ultra-deep ancient fracture-cavity carbonate reservoirs below 7 000 m [J]. Natural Gas Geoscience, 31 (5) : 587-601.
- Zhao, D. F., Tan, X. C., Luo, W. J., et al., 2022. Karst characteristics at early diagenetic stage and their enlightenment for the origin of ancient deep carbonate reservoirs: a case study of the Member 4 of Dengying Formation in Moxi 8 well area, central Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 43 (9) : 1236-1252.
- Zhang, S. H., Sima, L. Q., Yan, Q. B., et al., 2011. The logging effectiveness evaluation of complex carbonate reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 33 (2) : 84-88.
- China Petroleum Exploration and Production Company.2020.Schlumberger Wireline Logging & Geosteering Tool Catalog and Mnemonics[M].

中文参考文献

- 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等, 2016.中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 21 (1) : 3-14.
- 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等, 2021.深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 42 (3) : 533-546.
- 李宁, 肖承文, 伍丽红, 等, 2014.复杂碳酸盐岩储层测井评价: 中国的创新与发展[J].测井技术, 38 (1) : 1-10.
- 李宁, 刘鹏, 武宏亮, 等, 2024.远探测声波测井处理解释方法发展与展望[J].石油勘探与开发, 51 (4) : 731-742.
- 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等, 2021.中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向

- [J].石油勘探与开发, 48(1): 52-67.
- 李潮流, 武宏亮, 李霞等, 2022. 倾斜电各向异性地层阵列感应测井数据处理新方法[J]. 石油学报, 43(10): 1439-1449.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 18(4): 181-192.
- 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 41(4): 655-683.
- 庞雄奇, 林会喜, 郑定业, 等. 2020. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J]. 地质力学学报, 26(5): 673-695.
- 潘政屹, 徐凌, 张黎, 等. 2022. 全球深层碳酸盐岩气藏勘探现状与开发特征[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 36(3): 1-12.
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 2015. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 42(5): 545-554.
- 宋泽章, 葛冰飞, 王文之, 等. 2023. 超深层油藏的定量表征及其对气藏形成的指示意义: 以川中古隆起北斜坡灯影组为例[J]. 地球科学, 48(2): 517-532.
- 田瀚, 张建勇, 李昌, 等. 2020. 成像测井在灯影组微生物岩岩相识别中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 42(5): 75-85.
- 田瀚, 杨敏. 2015. 碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J]. 物探与化探, 39(3): 545-552.
- 田瀚, 沈安江, 张建勇, 等. 2019. 一种缝洞型碳酸盐岩储层胶结指数 m 计算新方法[J]. 地球物理学报, 62(6): 2276-2285.
- 田瀚, 闫伟林, 武宏亮, 等. 2023. 一种陆相页岩油岩相测井定量识别方法[J]. 地球物理学进展, 38(5): 2122-2134.
- 唐晓明, 魏周拓, 苏远大, 等. 2013. 偶极横波远探测测井技术进展及其应用[J]. 测井技术, 37(4): 333-340.
- 唐晓明, 魏周拓. 2012. 声波测井技术的重要进展: 偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 31(1): 10-17.
- 武宏亮, 刘鹏, 王克文, 等. 2020. 偶极横波远探测测井种反射波振幅恢复方法[J]. 石油学报, 41(4): 457-466.
- 武宏亮, 刘鹏, 伍丽红, 等. 2021. 碳酸盐岩储层井旁缝洞体反射横波提取方法[J]. 石油学报, 42(10): 1337-1345.
- 王俊鹏, 曾联波, 周露, 等. 2023. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层储层裂缝发育模式及开发意义[J]. 地球科学, 48(7): 2520-2534.
- 王嵩然, 李潮流, 刘英明, 等. 2024. 高阻地层 HDIL 阵列感应影响因素分析与校正方法[J]. 石油科学通报, 9(1): 50-61.

- 杨海军, 陈永权, 田军, 等.2020. 塔里木盆地轮探 1 井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 25 (2): 62-72.
- 尹中旭, 王跃祥, 谢冰, 等.2020. 碳酸盐岩地层油基泥浆井阵列感应测井适用性分析及电阻率校正方法[C].中国地球科学联合学术年会, 重庆, 3735-3738.
- 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等.2020. 四川盆地蓬探 1 井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探, 25 (3): 1-12.
- 朱光有, 孙崇浩, 赵斌, 等.2020. 7000m 以深超深层古龙缝洞型碳酸盐岩油气储层形成、评价技术与保存下限[J].天然气地球科学, 31 (5): 587-601.
- 赵东方, 陈长伟, 宋舜尧, 等.渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩层系不同岩性储层结构特征[J/OL].地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220622.0901.002.html>.
- 赵东方, 谭秀成, 罗文军, 等.2022. 早成岩期岩溶特征及其对古老深层碳酸盐岩储层的成因启示-以川中地区磨溪 8 井区灯影组四段为例[J].石油学报, 43 (9): 1236-1252.
- 张尚华, 司马立强, 颜其彬, 等.2011. 复杂碳酸盐岩储层测井有效性评价[J].西南石油大学学报 (自然科学版), 33 (2): 84-88.
- 中国石油勘探与生产分公司编译, 2020.斯伦贝谢测井与地质导向技术手册及缩略语[M].