



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目: 塔中东部志留系柯坪塔格组储层含油差异性测井评价
作者: 王松, 王贵文, 曾联波, 赖锦, 程钊, 赵红, 黄若坤, 程林, 王志始
收稿日期: 2024-08-28
网络首发日期: 2024-12-05
引用格式: 王松, 王贵文, 曾联波, 赖锦, 程钊, 赵红, 黄若坤, 程林, 王志始. 塔中东部志留系柯坪塔格组储层含油差异性测井评价[J/OL]. 地球物理学进展.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20241205.1200.070>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

塔中东部志留系柯坪塔格组储层含油差异性测井评价

王松^{1,2} 王贵文^{1,2} 曾联波^{1,2} 赖锦^{1,2} 程钊³ 赵红³ 黄若坤³ 程林⁴ 王志始^{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; 3. 中国石油塔里木油田分公司, 勘探开发研究院, 新疆库尔勒, 841000; 4. 中国石油塔里木油田分公司, 油气田产能建设事业部, 新疆库尔勒, 841000)

摘要 塔中东部地区志留系柯坪塔格组是塔里木盆地重要的海相含油气层系, 油气藏诞生于潮坪沉积体系背景, 经历了多期次的构造调整, 导致油水层宏观展布具有极强的非均质性, 制约了志留系油藏的勘探开发。本文综合利用岩心、薄片、岩心分析测试、试油试采、常规及核磁共振测井等资料, 厘清了油水层在常规测井中的响应特征, 利用核磁共振测井阐明了储层孔隙结构与含油性的关系, 通过不同位置处的典型井组成的连井剖面, 解剖了塔中东部志留系柯坪塔格组油水层在纵横向上的展布特征, 根据测井解释结论、孔隙度计算结果与电阻率测量值, 解析了不同构造位置的油水层宏观分布, 并通过解剖单井明确了形成现今油水层分异状态的遐想微观模式。结果表明, 古油藏破坏过程中, 孔隙结构较好的油层率先受到破坏, 储集空间被地层水占据, 形成现今物性较好的水层区域, 孔隙结构相对较差的油层反而被保存。

关键词 塔中地区; 志留系; 柯坪塔格组; 含油差异性; 测井评价

Logging Evaluation of Oil Differentiation in Silurian of the Kepingtage Formation Reservoirs, TaZhong Tarim Basin

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Kolar 841000, Xinjiang, China; 4. Oil & Gas Productivity Construction Department, Tarim Oilfield Company, CNPC, Kolar 841000, Xinjiang, China)

Abstract In the eastern Tarim Basin, the Silurian Kepingtage Formation represents a crucial marine hydrocarbon-bearing system, originating within a tidal flat depositional environment. This formation has undergone multiple structural adjustments, leading to pronounced heterogeneity in the macroscopic distribution of oil and water layers, posing challenges for the exploration and development of Silurian oil reservoirs. This study leverages core samples, thin sections, core analysis, oil testing, sampling, and both conventional and nuclear magnetic resonance (NMR) logging data to delineate the response characteristics of oil and water layers in conventional logging. The application of NMR logging further elucidates the intricate relationship between reservoir pore structures and hydrocarbon saturation. Through detailed analysis of well profiles across diverse locations, the study dissects the vertical and horizontal distribution patterns of oil and water layers within the Silurian Kepingtage Formation in eastern Tarim. Utilizing logging interpretation, porosity calculations, and resistivity measurements, the research assesses the macroscopic distribution of oil and water layers across various structural settings. Single-well analyses provide insights into conceptual microscopic models that explain the current differentiation of oil and water layers. The results show that during the destruction of ancient oil reservoirs, oil layers with better pore structures were the first to be damaged. The reservoir space was occupied by formation water, creating areas with better current physical properties that are now water layers, while oil layers with relatively poorer pore structures were preserved.

Key words Tazhong Area; Silurian; Kepingtage Formation; Oil Content Variability; Oil Content Variability

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 受中国博士后科学基金面上项目(2024M753612)和国家资助博士后研究人员计划(GZC20233101)联合资助。

作者简介: 王松, 男, 1993年生, 博士后, 研究方向为测井地质学. E-mail: wangsongcupb@qq.com.

网络首发时间: 2024-12-05 14:46:50 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20241205.1200.070>

0 引言

塔中地区志留系海相碎屑岩地层是塔里木盆地重要的勘探层系之一,自上世纪 90 年代起塔中 4、塔中 20 和塔中 10 井在志留系获低产油流,拉开了塔中志留系碎屑岩勘探的序幕,随后塔中 11 井和塔中 12 井的突破,掀起塔中志留系油藏勘探的热潮,近年来中深 101 井的突破掀起了塔中志留系油藏第 3 次滚动勘探开发的高潮(段中钰等, 2011; 池林贤等, 2020; 吕修祥等, 2008; 胡金祥等, 2014)。研究表明,志留系油藏具有三期成藏、多期调整的特征油气充注,以海西晚期和喜山期为主,油源主要来自寒武系(段中钰等, 2011; 吴悠等, 2017)。同时,原油密度多样,凝析油、正常油、稠油、干沥青共存,成藏演化历程复杂,多期充注与调整导致了塔中志留系差异聚集的格局(池林贤等, 2020)。另外,塔中志留系柯坪塔格组沉积体系以潮坪环境为主,双向水流特征动力学机制复杂,沉积砂体横向变化快,储层物性变化大,导致储层分布具有极强的非均质性,为油水层的识别与预测带来了巨大困难(徐燕军等, 2012; 黄若坤等, 2017; 贾进华, 2019; Zhang et al., 2008)。鉴于此,在前人研究基础上,本文通过岩心、薄片和分析测试数据,厘清了储层岩石学特征和储集空间类型,在此基础上,综合利用常规、核磁测井及试油试采资料,明确了研究区油水层测井响应特征,通过核磁测井,阐明了储层油水特征与储层孔隙结构的关联性,明确了研究区油水层宏观展布形态,揭示了油水层微观运移机制,为塔中东部志留系柯坪塔格组的碎屑岩勘探开发提供借鉴。

1 地质概况

塔里木盆地是我国面积最大的含油气复合型盆地,其周缘被天山、昆仑山和阿尔金山等 3 大山系环绕,内部可划分为库车坳陷、塔北隆起和中央隆起等 7 个构造单元,总体呈现“三隆四坳”的构造格局(图 1a)(王清华等, 2024; 张承泽等, 2008)。塔里木盆地周缘虽然在印支期、燕山期和喜山期经历多次碰撞与造山运动,但研究区塔中凸起因位于盆地中央,远离造山带,变现出构造整体稳定,变形微弱的特点(姜忠正等, 2024; 张仲培等, 2020; 罗彩明等, 2022)。

塔中凸起形成于加里东中期,经加里东晚期、海西期两次改造最终定型,中奥陶世末-晚奥陶世初,碰撞造山作用改变塔里木的区域构造状态,从弱伸展转变为强挤压,塔中 I 号断裂、中央主垒带以及塔中 10 号构造带等冲断构造形成,派生出北东-南西向的走滑断裂(图 1b)(彭丽等, 2019; 吴悠等, 2017)。奥陶纪末,由于来自南部强烈的挤压构造作用,塔中东部隆起区抬升形成碳酸盐岩潜山(Chen et al., 2024; 熊昶等, 2024)。志留系在此基础上继承性发展,呈东高西低的特征,地层厚度自西向东逐渐减薄。志留世-中泥盆世,昆仑早古生代碰撞造山带进入造山后构造演化阶段,形成北东-南西向为主的张扭性走滑断裂,塔中古隆起的基本定型(柏秉辰等, 2024; 张仲培等, 2020)。

塔中东部柯坪塔格组为一套潮坪—潮汐三角洲沉积复合体系,发育典型的潮间带、潮汐三角洲及潮下带亚相(杨帅等, 2014; 徐燕军等, 2012; 曾庆鲁等, 2019)。其中,潮汐水道和潮汐砂坝为水动力较强潮汐作用的结果,是有利的储集相带;泥坪、砂泥混合坪和陆架泥等微相形成于水动力较弱的沉积环境,岩性致密,能够有效保存油气。塔中东部志留系自下而上可划分为柯坪塔格组、塔塔埃尔塔格组和依木干他乌组。研究区探井主要钻遇柯坪塔格组上段,探根根据岩性、沉积旋回和测井特征,柯坪塔格组上段可进一步分为上 1 亚段($S_{1k^{1-1}}$)、上 2 亚段($S_{1k^{1-2}}$)和上 3 亚段($S_{1k^{1-3}}$)三个岩性段(图 1c)。

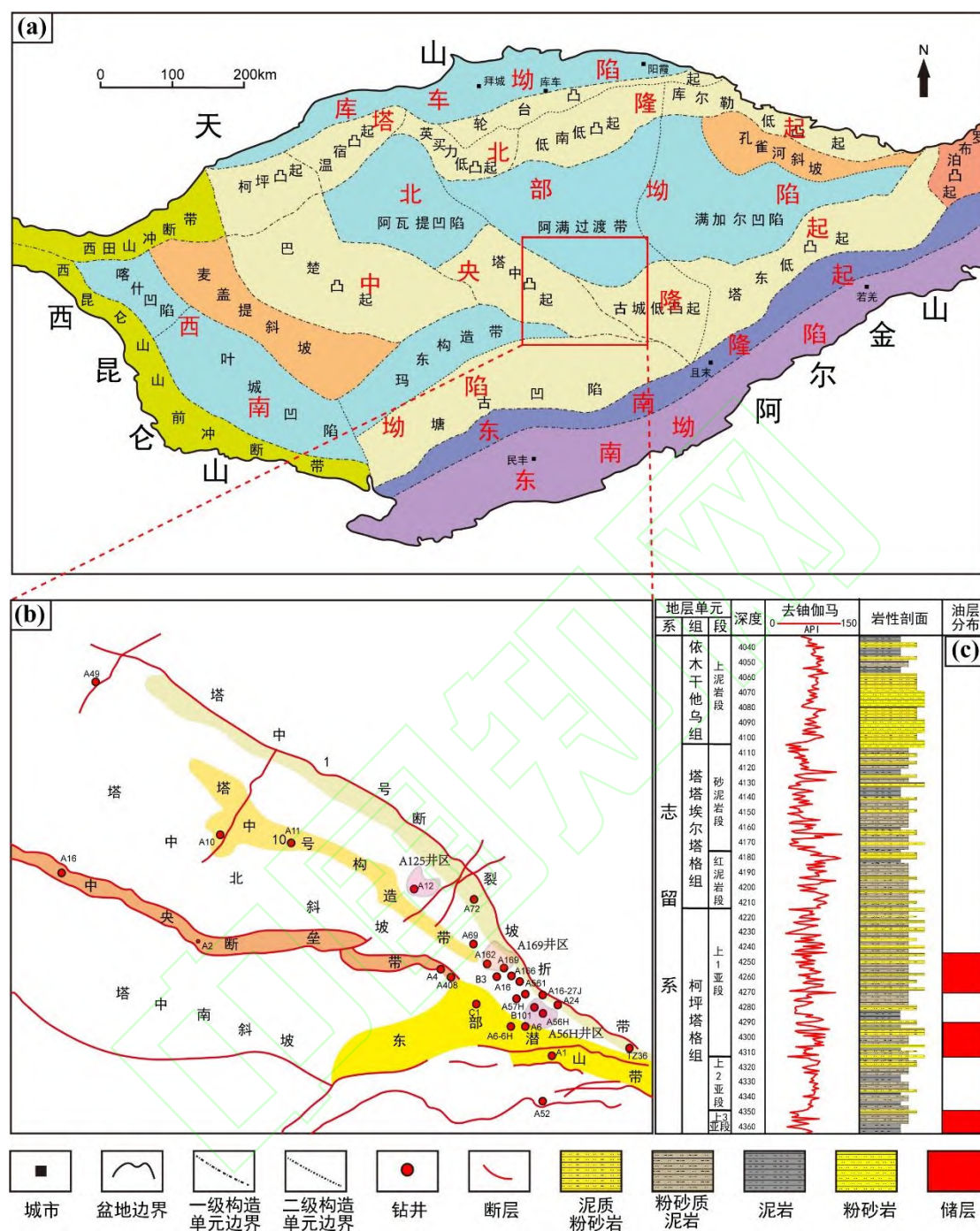


图1 研究区构造位置及沉积环境平面分布图(据彭丽等,2019;据吴悠等,2017,有修改)

Fig.1 Structural location and sedimentary environment distribution map of the study area (Modified by Peng et al.,2019;Wu et al.,2017)

2 储层特征

2.1 岩性特征

志留世是塔里木盆地重要的海陆转换期, 塔中东部柯坪塔格组为一套潮坪-三角洲沉积体系, 发育潮汐水道、潮汐砂坝、砂坪和砂泥混合坪等微相类型(陈海颖和张立强, 2023; 曾庆鲁等, 2019; 贾进华, 2019)。岩心观察结果表明, 组成研究区目的层的岩石类型主要有: 细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩, 并发育潮坪环境中的典型沉积构造(图 2)。图 2a 展示了潮坪沉积环境中典型的潮汐水道微相, 岩心中可以观察到典型的下粗上细的正粒序, 见底砾岩, 是潮坪沉积体系中储集能力最好

的微相类型；由于潮坪沉积体系的主要水动力和沉积能量来源是潮汐作用，形成往复水流，在潮间带会形成特殊的过渡性层理，如透镜状层理（图 2b）、压扁层理（图 2c）和波状层理（图 2d）。

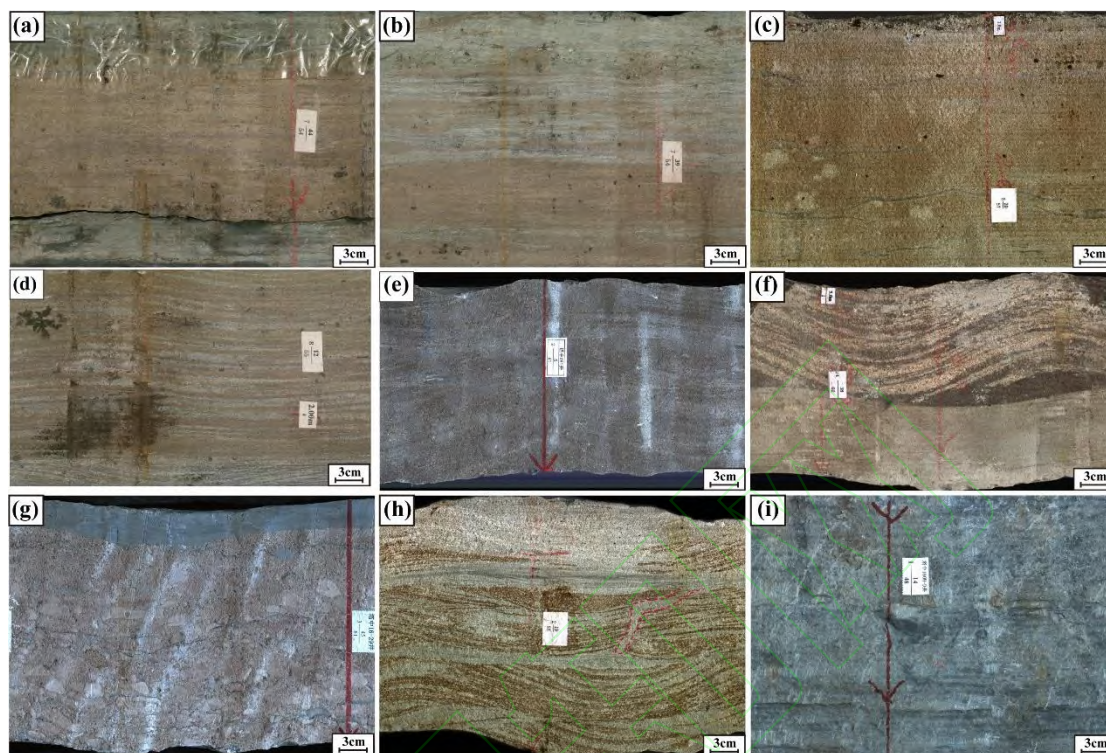


图 2 塔中东部柯坪塔格组典型岩性特征

Fig.2 Typical lithological characteristics of the Kepingage Formation in the eastern of Tazhong Uplift

- (a) A58 井，粉砂岩，潮汐水道，含底砾岩，正韵律，4225.51m；(b) A58 井，泥质粉砂岩，砂泥混合坪，透镜状层理，4224.67m；(c) A69 井，粉砂岩，砂坪，压扁层理，4350.64m；(d) A58 井，泥质粉砂岩，砂泥混合坪，波状层理，4228.77m；(e) A691 井，粉砂岩，砂坪，双向交错层理，4226.43m；(f) A82 井，泥质粉砂岩，潮汐砂坝，斜层理，反粒序，4381.80m；(g) A16-29 井，含粒细砂岩，风暴沉积，4090.11m；(h) A69 井，泥质粉砂岩，潮砂脊，羽状交错层理，见生物钻孔，4225.53m；(i) A160H-D 井，灰色粉砂质泥岩，陆架泥，4134.60m。

在潮间带上部的砂坪中还会出现双向交错层理（图 2e），而在潮间带下部会发育反韵律的潮汐砂坝，并且会冲刷下部水道形成再作用面（图 2f）。潮下带是潮坪沉积体系中水动力最强的地带，当风暴来临时会内碎屑打碎，形成杂乱的含砾层段（图 2g）。潮下带的潮流速度快且方向交替，在窄而深的通道区域，尤其适合形成经典的羽状交错层理，局部可见生物钻孔（图 2h）。岩心中还出现了暗色或灰色的泥岩，通常是深部的水动力较弱的陆架泥岩（图 2i）。

2.2 矿物成分与储集空间

薄片和扫描电镜观察结果表明：按照成分分类，研究区柯坪塔格组岩石类型主为细-中粒的岩屑砂岩，镜下可以观察到组成岩石的主要骨架矿物有石英、岩屑和长石，石英呈圆-次圆状，颗粒之间为点线接触（图 3a 和 b），对应了主要的储集空间为原生粒间孔和粒间溶孔（图 3a-e）。与石英颗粒相比，长石在沉积成岩过程中更不稳定，极易在酸性流体的作用下发生溶蚀而产生粒内溶孔（图 3b、d、e 和 g）。

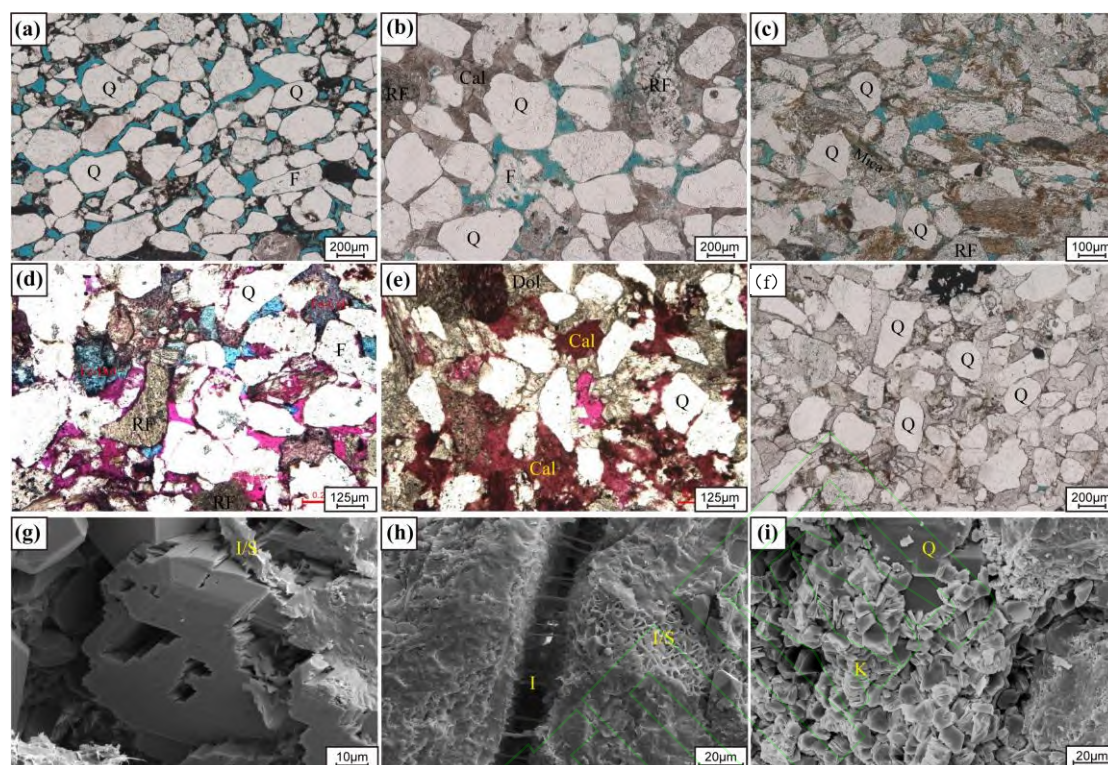


图3 塔中东部柯坪塔格组储集空间特征
Fig.3 Characteristics of reservoir space in the Kepingtag Formation, eastern Tazhong Uplift

(a) A57H 井, 细中粒岩屑砂岩, 粒间(溶)孔, 蓝色铸体, 4055.20m; (b) A57H 井, 中粒岩屑砂岩, 粒间(溶)孔, 粒内溶孔, 蓝色铸体, 4057.22m; (c) A56H 井, 含云中粒岩屑砂岩, 粒间(溶)孔, 蓝色铸体, 4034.67m; (d) A16-29 井, 细中粒岩屑砂岩, 碳酸盐岩胶结, 粒间(溶)孔, 粒内溶孔, 红色铸体, 茜素红和铁氰化钾混合液染色, 4066.18m; (e) A16-27J 井, 含云细中粒岩屑砂岩, 粒间溶孔, 4145.96m; (f) A56H 井, 细粒岩屑砂岩, 见黄铁矿, 3972.90m; (g) A56H 井, 长石粒内溶孔, 伊蒙混层, 3977.78m; (h) A56H 井, 伊利石桥接式充填在粒间孔, 颗粒表面见伊蒙混层, 3972.50m; (i) A69 井, 颗粒间充填高岭石和自生石英晶体, 4218.03m. Q=quarA; RF=rock fragments; F=feldspar; Cal=calcite; Fe Cal=Fe-calcite; Dol=dolomite; Fe-Dol=Fe-dolomite.

主要的填隙物类型有碳酸盐岩胶结物和长石蚀变转化而成的黏土矿物(图 3c-f)。其中碳酸盐岩胶结物有方解石、白云石、铁方解石和铁白云石, 这些胶结物充填在孔隙中, 不但导致储层物性变差, 还是引起储层孔隙结构复杂化的重要原因之一(图 3d)。扫描电镜下则更清楚地展示了研究区孔隙空间内部和矿物颗粒表面的黏土矿物类型, 如附着在矿物颗粒表面的伊蒙混层(图 3g 和 h)、充填在孔隙吼道之间呈桥接式产状的伊利石(图 3h)和充填在颗粒间及表面的书页状高岭石(图 3i), 这些黏土矿物是导致储层物性和孔隙结构变差的重要原因。

2.3 物性特征

本次研究采用塔中东部志留系柯坪塔格组的 5 口取心井中的 265 个样本点, 绘制孔隙度与渗透率交汇图来反映储层的物性特征, 交汇图显示孔渗关系具有良好的相关性(图 4)。孔隙度范围为 0.6%~17.1%, 平均为 7.8%, 渗透率区间为 0.01~44.60mD, 平均为 12.1mD。研究区地处塔里木盆地中央区, 构造活动相对稳定, 岩心和薄片观察结果未见大量天然裂缝, 交汇图中低孔隙度少见高渗异常点。因此, 研究区主要是由原生粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔组成的孔隙型储层, 天然裂缝在研究区并未起决定性作用。

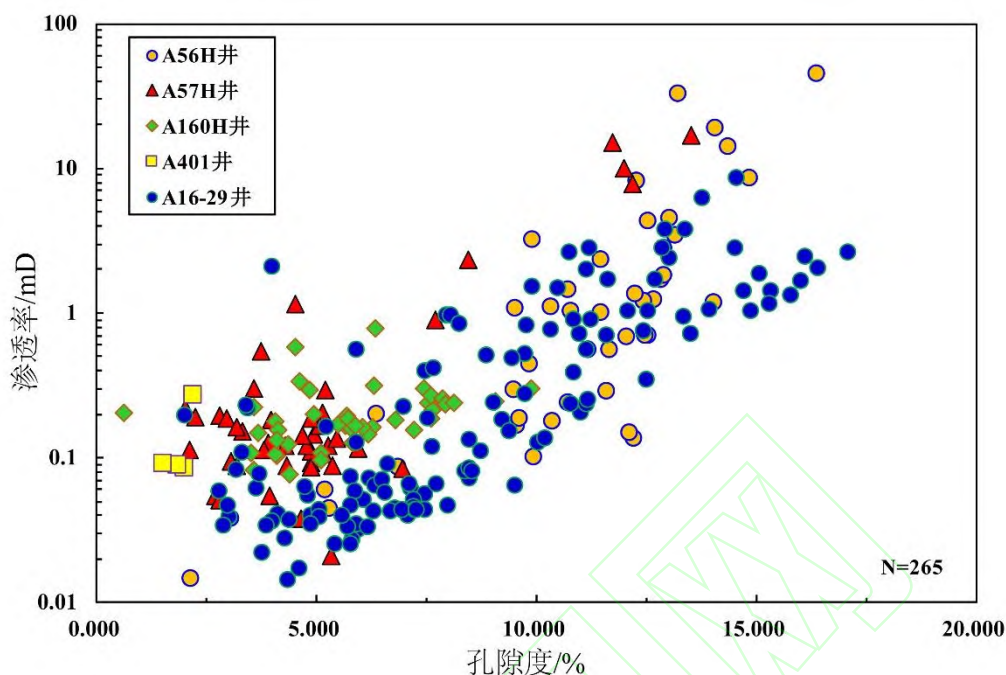


图4 塔中东部志留系柯坪塔格组岩心孔隙度-渗透率交汇图

Figure 4 Porosity-permeability crossplot of core samples from the Silurian Kepingtage Formation in the eastern of Tazhong Uplift

3 储层测井响应特征

3.1 常规测井响应特征

常规测井资料是储层评价过程中最简单直接的测井资料，因其相对低的成本和测量速度快的特点，在风险探井和开发井中成为了必测项目，也是储层参数计算和流体性质识别的重要工具(黄若坤等, 2017; Wang et al., 2024)。本次研究中采用了常规测井资料包括：去铀伽马（KTH）、井径（CAL）、深电阻率（M2RX）、浅电阻率（M2R3）、声波时差（DT24）、密度（ZDEN）和中子测井（CNC），不同测井系列的曲线在油层、水层和干层中显示出不同的测井响应特征，以便于解释人员可以在单井上区分储层类型。

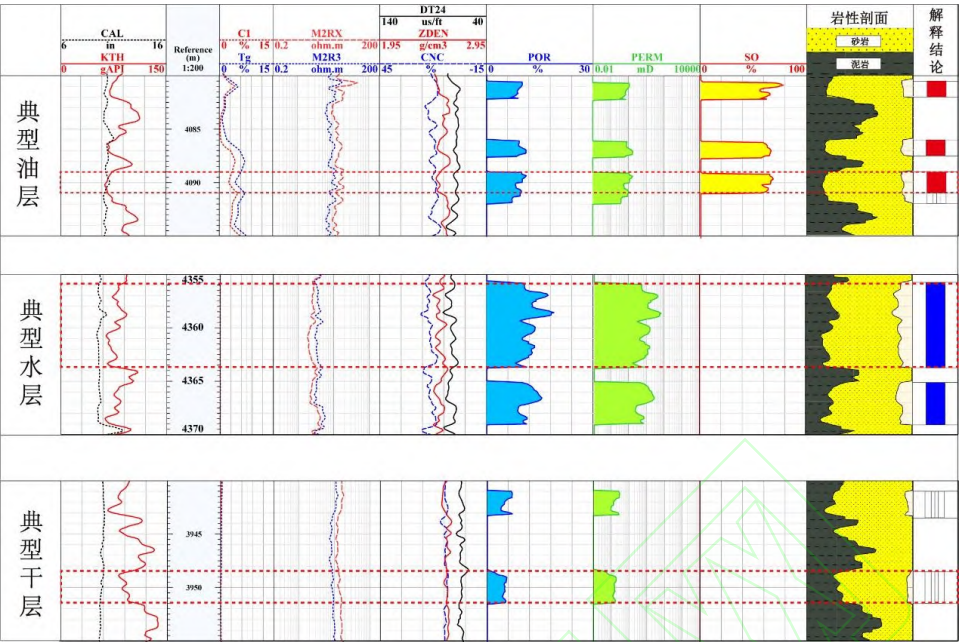


图 5 塔中东部志留系典型油水干层常规测井响应特征
Fig.5 Characteristics of Conventional Well Logging Responses in Typical Oil, Water, and Dry Reservoirs of the Silurian System in Eastern Tarim Basin

研究区柯坪塔格组典型的油层、水层和干层在常规测井曲线中显示出较强的差异（表 1）。典型油层具有低去铀伽马、低密度、高声波时差、高中子和高电阻（一般大于 5ohm.m）的特征；根据孔隙度差异，可细分为油层和差油层，油层孔隙度大于 10%，差油层孔隙度介于 7%~10%之间；典型水层同样具有低去铀伽马、低密度、高声波时差和高中子特征，但与油层相比出现低电阻（一般小于 5ohm.m）响应；典型干层具有中等去铀伽马、高密度、低声波时差和低中子特征，还会因物性较差而展现出高电阻特征，具体见表 1。

表1 塔中东部志留系柯坪塔格组储层测井响应

名称	油层	差油层	水层	干层
声波时差	>68	63~68	>63	<63
密度	<2.51	2.51~2.54	<2.54	>2.54
电阻率	>5	>5	<5	>5
孔隙度	>10	7~10	>7	<7
渗透率	>0.5	0.3~0.5	>0.3	<0.3
含油饱和度	>50	>50	<30	--

本文将研究区内试油试采数据、深电阻率和测井计算孔隙度投放在交汇图中，形成流体性质识别图版，并建立水层、干层和油层分区，将上述典型层段的数值投放在图版中，经过验证表明常规测井解释结果和流体图版具有较好的一致性。

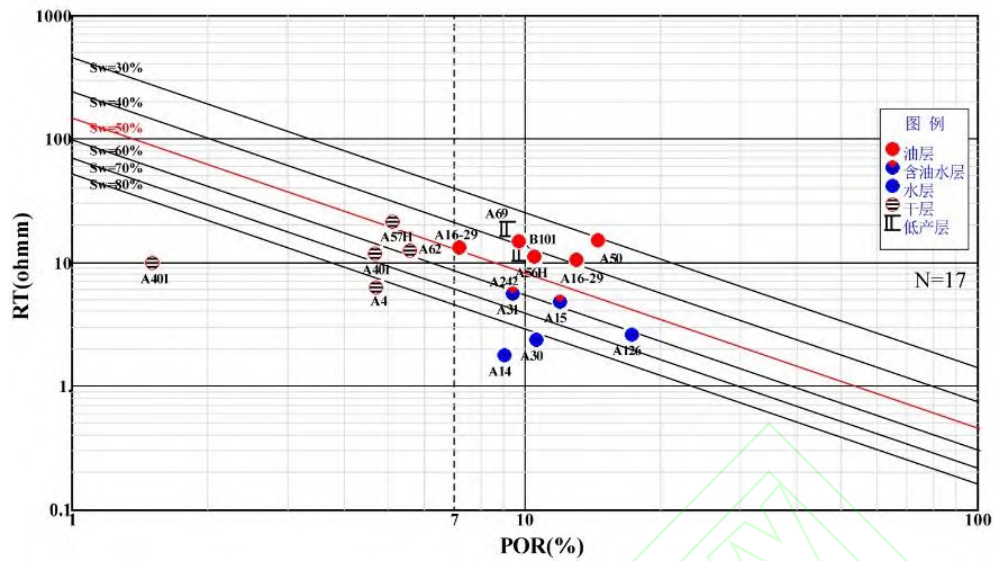


图 6 塔中东部志留系柯坪塔格组储层流体性质识别图版
Fig.6 Fluid Property Identification Chart for the Silurian Kepingtage Formation Reservoir in Eastern Tazhong Uplift

3.2 核磁测井响应特征

核磁共振测井是目前公认的针对复杂储层孔隙结构测井评价最有效的手段(曹志锋等, 2024; 李宁等, 2023; 魏玺等, 2024)。研究过程选择了泥质含量和孔隙度值相差不大的油水层做核磁共振测井响应特征对比, 旨在探索不同流体类型与孔隙性的配伍关系。图 7a 展示了塔中东部志留系柯坪塔格组典型水层的常规与核磁测井响应, 4152.5~4155.0m 的典型水层常规测井响应与图 5 中典型水层相同, 具有较低的电阻率 (<5ohm.m) 和相对大的孔隙度 (>7%) ; 核磁共振测井 T₂ 谱显示出双峰右偏或右单峰的形态特征, 本段核磁共振 T₂ 谱反演的区间孔隙度直方图显示了大孔隙占比较大 (红色柱子) ; 核磁共振测井均值曲线显示了双峰右偏的特点, 且右峰在截止值 33ms 右侧, 定性反应储层具有大孔隙粗吼道的特点。

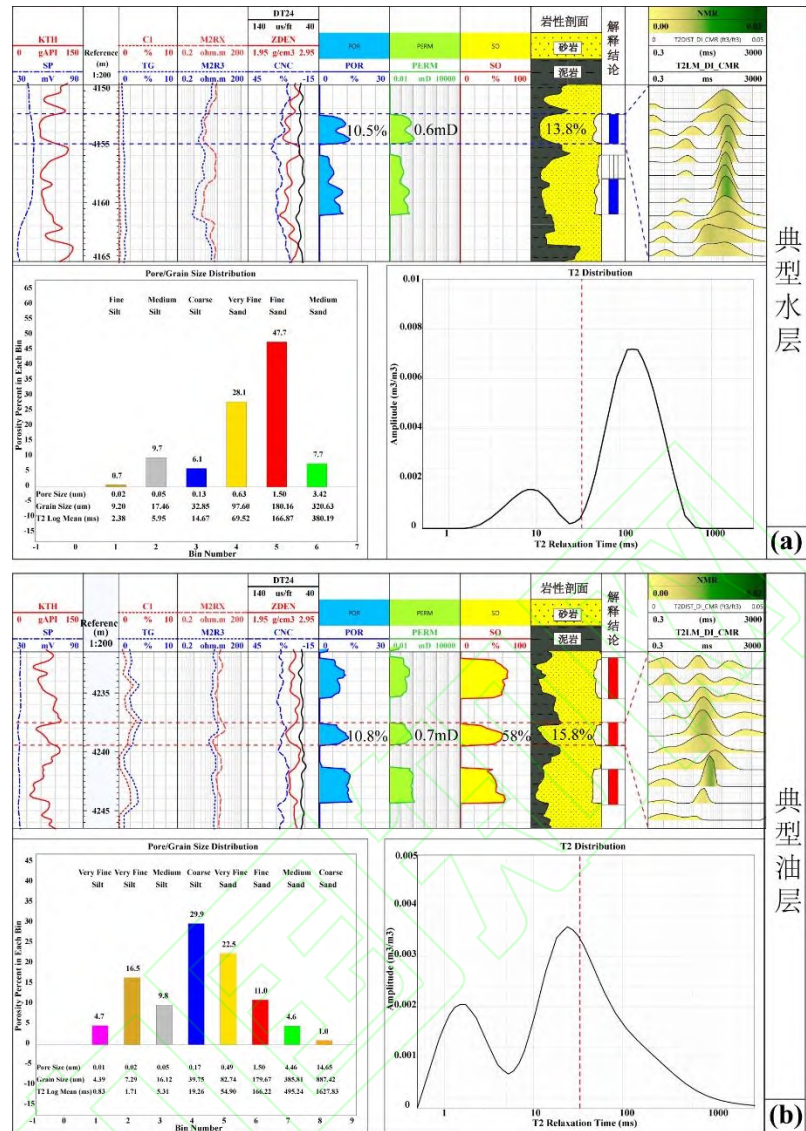


图7 塔中东部志留系柯坪塔格组典型油水层核磁共振测井响应
Fig.7 NMR Logging Response of Typical Oil and Water Layers in the Silurian Kepingtage Formation in Eastern Tazhong Uplift

油层在核磁共振测井中的响应与水层具有明显差异(Rezaee et al., 2012; Kadkhodaie et al., 2021), 图 7b 展示了塔中东部志留系柯坪塔格组典型油层的常规与核磁测井响应, 4237.5~4239.5m 的典型油层常规测井响应与图 5 中典型油层相同, 具有高电阻率 ($>50\Omega\cdot m$) 和大的孔隙度 ($>7\%$) 的特征; 核磁共振测井 T_2 谱显示出双峰右偏或双峰不偏的形态特征, 本段核磁共振 T_2 谱反演的区间孔隙度直方图显示了中等孔隙占比较大 (蓝色柱子), 同时, 小孔部分的占比也大于水层; 核磁共振测井均值曲线显示了双峰特点, 但两个峰均在截止值 33ms 左侧, 即在泥质含量和孔隙度相似的情况下, 油层的孔隙结构与水层相比相对较差。

4 油水层宏观展布及微观运移模式

4.1 油水层宏观展布特征

本研究通过深电阻率、测井计算孔隙度结合流体性质识别图版 (图 6) 识别油水层, 通过对比不同井区单井解释结果与孔隙度-电阻率交汇图, 厘清了塔中东部北斜坡区到东部潜山高部位的油水层展布特征。图 8 在每个井区选择了一口典型井, 通过绘制从塔中凸起北斜坡至塔中东部潜山区, 即塔中东部由西北向东南方向 (塔中 125 井区-塔中 69 井区-塔中 56H 井区) 的连井剖面。连井剖面显示

志留系油藏由西北向东南方向,主力层系由柯坪塔格组上1亚段逐渐过渡至上2亚段,最后在东部高部位富集于上3亚段(图8a)。同时,由于储层是在潮坪沉积环境中形成的,优质储层主要集中在潮汐水道和潮汐砂坝砂体中,在潮下带则主要是在潮砂脊砂体,潮汐的双向水流特征致使储层在纵横向上具有极强的非均质性,因此形成油层在连井剖面中几乎没有储层单层厚度超过5m,呈现出单层厚度薄的特点。

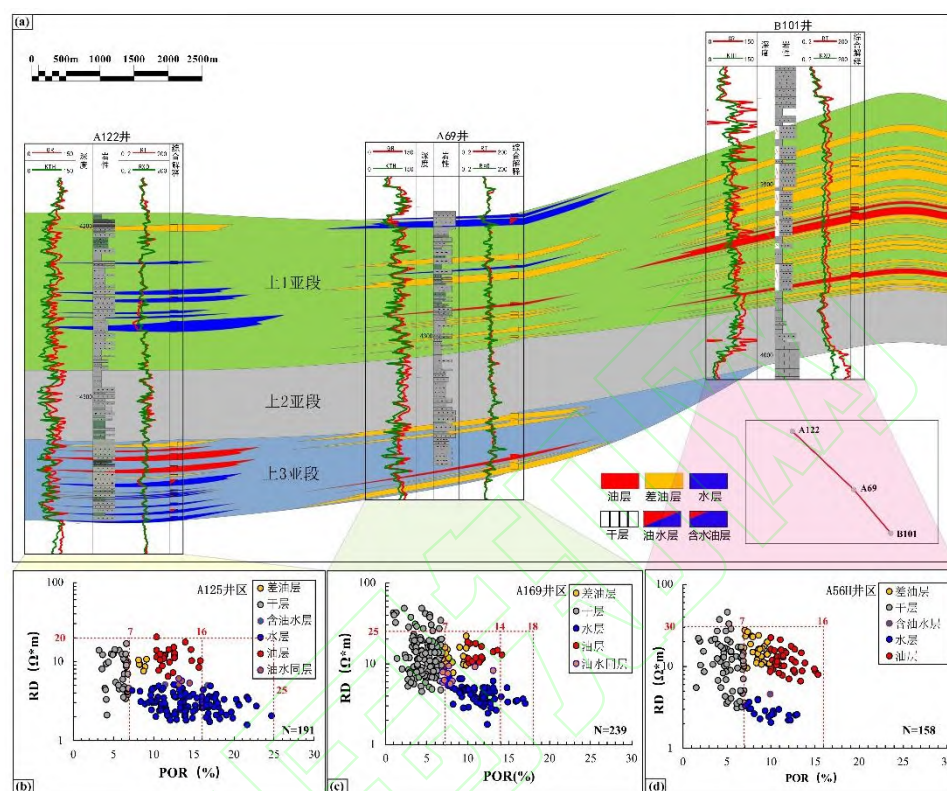


图8 塔中东部志留系 A122 井-A69 井-B101 井油水层连井剖面
Fig.8 Profile of the oil-water layer connecting Well A122, A69 and B101 in the East of the Silurian system of the Tazhong Uplift.

各井区测井解释结论与孔隙度-电阻率交汇图的几个分界点也显示出不同构造位置油水展布特征具有差异(图8b-d)。交汇图中灰色点为干层点,由于各区采用同样的孔隙度下限,因此当孔隙度 $<7\%$ 时,均解释为干层。交汇图中红色和橘黄色的点分别为油层和差油层,其中差油层的孔隙性比油层差,孔隙度介于 $7\% \sim 10\%$ 之间,表现为相对较低的孔隙度;油层孔隙度 $>10\%$,且电阻率与差油层相当,显示出更好的含油性。由西北向东南方向,储层平均孔隙度在交汇图中也表现为逐步降低的趋势,油层与差油层的电阻率上限由 20ohm.m 逐步增加到 25ohm.m ,最东部的构造高部位则为 30ohm.m ,表明含油性逐渐变好,含油饱和度也会增加。图8b和8c中水层与油层的分界点分别为 16% 和 14% ,即当孔隙度 $>16\%$ 和 14% 时,这两个井区内储层含水的概率增大,与常规油藏中孔隙度越高含油性越好的规律相反。然而,56H井区储层孔隙度越大含油性并没有减弱,这是因为56H井区更靠近物源,沉积期搬运距离短,储层成分成熟度和结构成熟度比西北方向的两个井区低,孔隙度最大值也没有超过 16% ;另一方面,与斜坡区的塔中125和塔中169井区相比,56H井区处于构造相对较高的部位,油藏在调整破坏的过程中,残余油气向构造高部位运移,造成了油水层难以由物性剥离的现象。

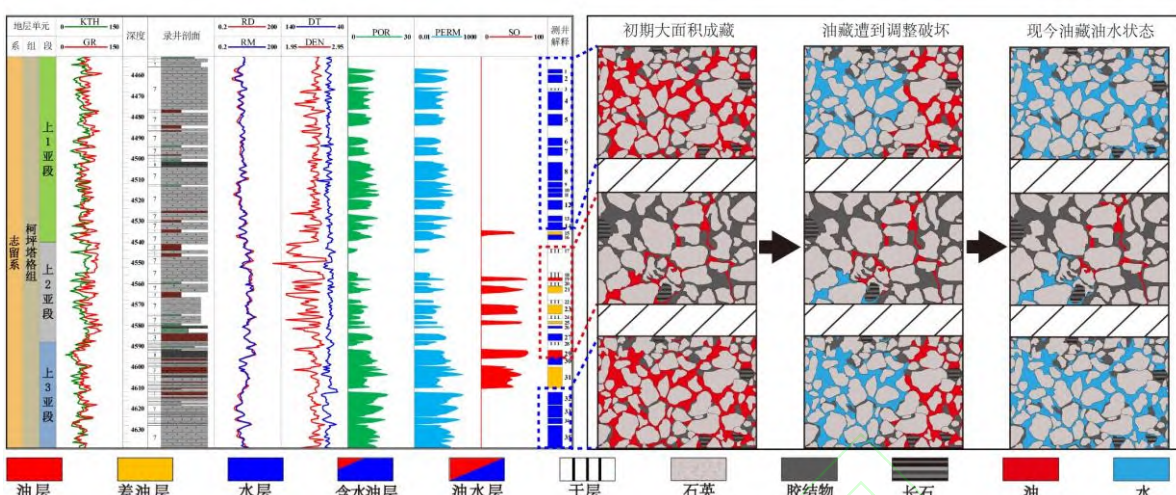


图 9 塔中东部志留系油水层分异过程微观模式
Fig.9 Microscopic Model of Oil-Water Layer Differentiation Process in the Silurian System of Eastern Tazhong Uplift.

4.2 微观油水分异遐想模式

图 9 展示了塔中东部志留系典型的单井测井解释结果，这口井纵向上没有出现高部位为油层，低部位为水层的正常浮力成藏结果，而是出现了上部为水层，下部为水层，中间为油层和差油层的纵向分布样式。油水倒置的油藏在我国勘探历程中并不常见，具有代表性的有准噶尔盆地西北缘侏罗系八道湾组，渤海湾盆地沾化凹陷东部馆陶组和松辽盆地中央凹陷泉头组，其成因虽然具有多样性，但其根本原因仍然是油藏浮力低于流体界面张力导致的，并没有发生与志留系油藏相似的大规模调整破坏(侯启军等，2006；余成林等，2008；严科和仁怀强，2009；陈振标，2017；Hu et al., 2024)。录井岩性结果表明柯坪塔格组上 1 亚段和上 3 亚段下部主要为细砂岩和中细砂岩，测井计算的孔隙度与渗透率也相对较高，这两段解释结论也多为水层；上 2 亚段与上 3 亚段顶部则主要是砂泥薄互层，测井孔隙度和渗透率相对中等，此段解释结论多为油层和差油层。

出现这种情况的原因，本文给出了如下解释，并绘制了遐想的微观模式（图 9）。研究表明，志留系油藏是一个具有初期大面积成藏特征，经历至少三次构造运动破坏后调整而形成的油气藏(段中钰等，2011；李祥权等，2021；胡健等，2015)。因此油藏破坏过程中，油气会先从孔隙度大且孔隙结构相对较好的砂体中逃逸，残余的储集空间则很容易被地层水占据，从而形成大孔隙含水的特征。相反地，孔隙度中等且孔隙结构相对较差的砂体内，油气反而被保存下来，形成中等孔隙的油气藏。同时，经历破坏后的油藏会进一步向构造高部位调整，从而造成塔中东部 56H 井区中，油水差异性与储层物性差异不匹配的特点；然而，斜坡区则呈现出大孔隙含水，中等孔隙含油的特征。因此，塔中东部志留系油藏油水关系复杂与储层原始物性、孔隙结构和局部构造部位密切相关，在勘探开发过程中应遵循这一规律，提出合理的勘探开发方案动用此类油藏。

5 结论

- 1) 塔中东部地区志留系柯坪塔格组上段的岩石类型主要有：细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩，发育潮坪环境中的典型沉积构造，如双向交错层理、过渡性层理和潮汐水道冲刷面等。储集空间类型主要为原生粒间孔、粒间溶孔和长石粒内溶孔，孔隙度均值为 7.7%，渗透率均值为 1.21mD，孔隙度与渗透率呈正相关，天然裂缝发育程度较低，储层呈现出典型的孔隙型特征。
- 2) 典型的油、水和干层在常规测井曲线容易区分。当孔隙度小于 7%时，为干层，具有中等去铀伽马、高密度、低声波时差和低中子的低孔隙度特征；油层具有低去铀伽马、高声波时差、低密度、高中子和高电阻特征，电阻率多大于 50hm.m，T₂ 谱展现为双峰不偏或双峰左偏特征，区间孔隙度直方图显示孔隙结构中等；水层具有低去铀伽马、高声波时差、低密度、高中子和低电阻特征，电阻率

多小于 50hm.m。T₂ 谱形态为双峰右偏特征，盲区见孔隙度直方图中大孔隙占比高，显示出相对好的孔隙度结构特征。

3) 塔中志留系油气藏是一个经历多期构造运动，破坏调整而形成的油气藏，古油藏被破坏时，孔隙结构较好的油层率先被地层水占据，孔隙结构相对较差的油层反而被保存，逃逸的油气继续向构造高部位调整运移。在斜坡区，孔隙度越大含油性越差，孔隙度结构中等含油性越好，因此会出现油气藏油水关系倒置的现象；在构造高部位，孔隙度与含油性没有明显的相关关系，油层仍然呈现出正常的浮力油藏特征。

4) 本文研究旨在通过利用测井资料识别单井储层流体性质，厘清研究区内重点井区的油水层纵横向展布特征，阐明塔中东部志留系柯坪塔格组油藏具有非典型的油水分布样式。由于文章篇幅有限，加之主要采用测井资料解释现象，只从储层物性和孔隙结构方面给出了遐想模式，没有揭示油水倒置现象的机理，在未来研究中，作者将从原油密度、粘度、地层孔隙压力、流体压力以及沥青质分布等方面深入解剖油藏，尝试揭示油水倒置的机理。

致谢：感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持！

References

附中文参考文献

- [1] Bai B C, Wu G H, Ma B S, et al. 2024. Segmented structural characteristics and growth mechanism of transtensional strike-slip fault zone in Tazhong uplift[J]. Xinjiang Petroleum Geology (in Chinese), 45(4):409-416.
- [2] Cao Z F, Ling H S, Meng X, et al. 2024. NMR logging environment analysis and T₂ spectrum oil layer identification method in low permeability reservoir [J]. Well Logging Technology(in Chinese) ,48(03):370-379.
- [3] Chen H Y and Zhang L Q. 2023. Study on the development of high-quality reservoirs of deep clasticrock based on diagenetic facies: taking the Kepingtage Formation in Shun 9 well area of Tarim Basin as an example[J]. Journal Of Palaeogeography(Chinese Edition)(in Chinese), 25(06):1379-1393.
- [4] Chen S, Zhang Y T, Xie Z, et al. 2024. Multi-stages of Paleozoic deformation of the fault system in the Tazhong Uplift, Tarim Basin, NW China: Implications for hydrocarbon accumulation[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 265:106086.
- [5] Chen Z B. 2017. Genesis of oil/water inversion and delineation of oil-bearing area in super-heavy oil reservoirs: A case study of the lower member of Guantao Formation in Block Cheng911-Ping1, Chengdong Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency(in Chinese), 24(05):53-57.
- [6] Chi L X, Zhang Z Y, Zhu G Y, et al. 2020. The molecular geochemical evidence of two accumulation stages of the Silurian reservoirs in Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience (in Chinese), 31(4):471-482.
- [7] Duan Z Y, Pang H, Pu Q S, et al. 2011. Hydrocarbon Accumulation Model of Silurian Strata of Oil-gas Reservoir in Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Science and Technology Review(in Chinese), 29(23):39-44.
- [8] Hou Q J, Wei Z S, Zhao Z Y, et al., 2006. Deep basin reservoir in Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development(in Chinese), 33(04):406-411.
- [9] Hu J, Wang T G, Chen J P, et al. 2015. Source recognition and charging analysis of oil in the Silurian bituminous sandstone in the Tarim Basin: Evidences from biomarker compounds[J]. Natural Gas Geoscience(in Chinese), 26(5):930-941.
- [10] Hu J X, Yan E, Du W W, et al. 2014. Analysis of exploration potential of Silurian oil and gas in the peripheral area of the Manjiaer depression[J]. Special Oil And Gas Reservoirs(in Chinese), 21(02):41-45.
- [11] Hu X, Pu L C, Zhang S H, et al., 2024. Micro formation mechanism of oil-water inversion in reservoirs based on water film theory-An example from the Dawangzhuang Oilfield in Bohai Bay Basin[J]. Fuel, 359:130501.
- [12] Huang R K, Qi T T, Han C, et al. 2017. The Application of Identification Method of Asphalt Sandstone Reservoir Liquid to the Exploration of Tazhong Silurian[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 14(01):116-122.
- [13] Jia J H. 2019. Sedimentary microfacies and sandbody distribution in the clastic tidal environment of the ancient coastal zone: A case study of Silurian in Tazhong area, Tarim basin [J]. Journal of China University of Mining and Technology (in Chinese), 48(1), 110-123.
- [14] Jiang Z Z, Tang D Q, Sha X G, et al. 2024. Structure and evolution of faults in central and northern parts of Tazhong Uplift Tarm Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology(in Chinese), 43(3):120-132.
- [15] Kadkhodaie R, Kadkhodaie A, Rezaee R. 2021. Study of pore system properties of tight gas sandstones based on analysis of the seismically derived velocity deviation log: A case study from the Perth Basin of western Australia[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 196, 108077.
- [16] Li N, Wang K W, Wu H L, et al. 2023. Permeability logging evaluation: Current status and development directions[J]. Petroleum Science Bulletin(in Chinese), 8(04):432-444.
- [17] Li X Q, Ding H K, Peng P, et al. 2021. Tazhong Silurian detrital zircons were mainly sourced from the Tiekelike uplift in the southwest margin of Tarim Basin[J]. Earth Science(in Chinese), 46(08):2819-2831.
- [18] Luo C M, Liang X X, Huang S Y, et al. 2022. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism[J]. Oil and Gas Geology(in Chinese), 43(01):118-131.
- [19] Lü X X, Bai Z K, Zhao F Y. 2008. Hydrocarbon accumulation and distributional characteristics of the Silurian reservoirs in the Tazhong uplift of the Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers(in Chinese), 15(2):156-166.
- [20] Peng L, Wang Z B, Yang J P, et al. 2019. Characteristics and controlling factors of low-permeability reservoirs in Silurian Kepingtage Formation, 10th tectonic belt in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology And Experiment (in Chinese), 41(03):355-362.
- [21] Rezaee R, Saeedi A, Clennell B. 2012. Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 88-89, 92-99.
- [22] Wang Q H, Cai Z Z, Zhang Y T, et al. 2024. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in

- Tarim basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology(in Chinese), 45(04):379-386.
- [23] Wang X D, Tian F, Yuan X Y. 2024. Improved pore structure prediction based on a stacking machine learning model for low-permeability reservoir in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Geoenergy Science and Engineering, 241,213135.
- [24] Wei X, Wang G W, Wang M, et al. 2024. Experimental Study on the Lower Limit of NMR Logging Physical Evaluation and Temperature-Pressure Characteristics of Low-Porosity and Low-Permeability Sandstone[J]. Progress in Geophysics(in Chinese).
- [25] Wu Y, Chen H H, Zhao Y T, et al. 2017. Evidences and controlling factors of hydrocarbon charging in the Late Silurian in the north slope of the Tazhong Uplift,Tarim Basin[J]. Oil And Gas Geology (in Chinese), 38(02):292-301.
- [26] Xiong C, Shen C G, Zhao X X,et al. 2024. Segmentation of strike-slip faults and its controls on hydrocarbon accumulation in Tarim basin: A case study of F₁₇ strike-slip fault zone[J]. Xinjiang Petroleum Geology(in Chinese), 45(04):417-424.
- [27] Xu Y J, Zhong D K, Sun H T.2012. Reservoir Characteristics and Main Control Factors of the Lower Sandstone Member Kepingtage Formation of SilurianinTazhongArea,TarimBasin[J].Science and Technology Review(in Chinese), 30(15):22-28.
- [28] Yan K, Ren H Q., 2009. Oil/water inversion and juxtaposition in heavy oil reservoirs:Taking 6-7 sand members of Guantao Formation Gudao Oilfield as an example[J]. Petroleum Exploration and Development(in Chinese), 36(05):635-640.
- [29] Yang S, Liu X F, Lu Y C, et al. 2014. Sedimentary Characteristics and Petroleum Geological Significance of Ancient Shelf Sand Ridges: A Case Study of Lower Member of Silurian Kepingtage Formation in Tarim Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences(in Chinese) ,39(07):858-870.
- [30] Yu C L., Lin C Y., Wang Z Y., 2008. Oil water Inversion and Its Genetic Mechanism of Badaowan Reservoir in Well Block Xia9 of Junggar Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology(in Chinese), 30(05):32-36+377.
- [31] Zhang Z P, Wang L Y, Deng S, et al. 2020. Kinematic characteristics and genesis analysis of segmental deformation in Tazhong No. 1 structural belt, Tarim Basin[J]. Geological Review(in Chinese), 66(04):881-892.
- [32] Zeng Q L, Wang L B, Wang C F, et al. 2019. Sedimentary system types and distribution of the 3rd upper sub-member of Silurian Kepingtag Formation in Tazhong area, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration (in Chinese), 24(01):95-104.
- [33] Zhang C Z, Yu H F, Zhang H Z, et al. 2008. Characteristic, genesis and geologic meaning of strike-slip fault system in Tazhong area[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition)(in CHinese), (05):22-26.
- [34] Zhang J L, Qin L J, Zhang Z J. 2008. Depositional facies, diagenesis and their impact on the reservoir quality of Silurian sandstones from Tazhong area in central Tarim Basin, western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 33:42-60
- [35] 柏秉辰, 郭光辉, 马兵山, 等, 2024. 塔中凸起张扭走滑断裂带分段构造特征及生长机制[J]. 新疆石油地质, 45 (04): 409-416.
- [36] 曹志锋, 令狐松, 孟鑫, 等, 2024. 低渗透率储层核磁共振测井环境分析与 T₂ 谱油层识别方法[J]. 测井技术, 48 (03): 370-379.
- [37] 陈海颖, 张立强, 2023. 基于成岩相的深层碎屑岩优质储集层发育规律研究: 以塔里木盆地顺 9 井区柯坪塔格组为例[J]. 古地理学报, 25 (06): 1379-1393.
- [38] 陈振标. 2017. 超稠油藏油水倒置成因及含油面积圈定探析-以埕东油田埕 911-平 1 块馆下段为例[J]. 油气地质与采收率, 24 (05): 53-57.
- [39] 池林贤, 张志遥, 朱光有, 等, 2020. 塔里木盆地塔中志留系油藏两期成藏的分子地球化学证据[J]. 天然气地球科学, 31 (4): 471-482.
- [40] 段中钰, 庞宏, 蒲青山, 等, 2011. 塔里木盆地塔中地区志留系油气成藏模式[J]. 科技导报, 29 (23): 39-44.
- [41] 侯启军, 魏兆胜, 赵占银, 等. 2006. 松辽盆地的深盆油藏[J]. 石油勘探与开发, 33 (04): 406-411.
- [42] 胡健, 王铁冠, 陈建平, 等, 2015. 塔里木盆地志留系沥青砂油源及充注期次分析——来自生物标志化合物的证据[J]. 天然气地球科学, 26 (05): 930-941.
- [43] 胡金祥, 闫娥, 杜伟维, 等, 2014. 环满加尔坳陷志留系油气勘探潜力分析[J]. 特种油气藏, 21 (02): 41-45.
- [44] 黄若坤, 齐婷婷, 韩闯, 等, 2017. 塔中志留系沥青砂岩储层流体性质识别方法及应用[J]. 工程地球物理学报, 14 (01): 116-122.
- [45] 贾进华, 2019. 古海岸带碎屑潮汐环境沉积微相与砂体分布——以塔中地区志留系为例[J]. 中国矿业大学学报, 48 (01): 110-123.
- [46] 姜忠正, 唐大卿, 沙旭光, 等, 2024. 塔里木盆地塔中隆起中北部地区断裂构造特征及演化[J]. 地质科技通报, 43 (03): 120-132.
- [47] 李宁, 王克文, 武宏亮, 等, 2023. 渗透率测井评价: 现状及发展方向[J]. 石油科学通报, 8 (04): 432-444.
- [48] 李祥权, 丁洪坤, 彭鹏, 等, 2021. 塔里木盆地塔中志留系柯坪塔格组物源示踪: 碎屑锆石 u-pb 年代学证据[J]. 地球科学, 46 (08): 2819-2831.
- [49] 罗彩明, 梁鑫鑫, 黄少英, 等, 2022. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制[J]. 石油与天然气地质, 43 (01): 118-131.
- [50] 吕修祥, 白忠凯, 赵风云, 2008. 塔里木盆地塔中隆起志留系油气成藏及分布特点[J]. 地学前缘, 15 (2): 156-166.
- [51] 彭丽, 王振彪, 阳建平, 等, 2019. 塔里木盆地塔中 10 号构造带志留系柯坪塔格组低渗储层特征及控制因素[J]. 石油实验地质, 41 (03): 355-362.
- [52] 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等, 2024. 塔里木盆地超深层走滑断控油气藏研究进展与趋势[J]. 新疆石油地质, 45 (04): 379-386.
- [53] 魏玺, 王贵文, 王猛, 等, 2024. 低孔低渗砂岩核磁共振测井物性评价下限及温压特性实验研究[J]. 地球物理学进展.
- [54] 吴悠, 陈红汉, 赵玉涛, 等, 2017. 塔中地区北坡志留系晚期油气充注证据及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 38 (02): 292-301.
- [55] 熊昶, 沈春光, 赵星星, 等, 2024. 塔里木盆地走滑断裂分段性及控藏作用-以 F₁₇ 断裂带为例[J]. 新疆石油地质, 45 (04): 417-424.
- [56] 徐燕军, 钟大康, 孙海涛, 2012. 塔中地区柯坪塔格组下砂岩段储层特征和主控因素[J]. 科技导报, 30 (15): 22-28.
- [57] 严科, 任怀强. 2009. 稠油油藏油水倒置现象探讨-以孤岛油田中一区馆陶组 6-7 砂层组为例[J]. 石油勘探与开发, 36 (05): 635-640.
- [58] 杨帅, 刘晓峰, 陆永潮, 等, 2014. 古陆架砂脊沉积特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地志留系柯坪塔格组下段为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39 (07): 858-870.

- [59] 余成林, 林承焰, 王正允. 2008. 准噶尔盆地夏 9 井区八道湾组油水倒置型油藏特征及成因[J]. 石油天然气学报, 30 (05): 32-36+377.
- [60] 张仲培, 王璐瑶, 邓尚, 等, 2020. 塔里木盆地塔中 I 号构造带分段变形的运动学特征与成因探讨[J]. 地质论评, 66 (04): 881-892.
- [61] 曾庆鲁, 王力宝, 王朝锋, 等, 2019. 塔中地区志留系柯坪塔格组上 3 亚段沉积体系类型及分布规律[J]. 中国石油勘探, 24 (01): 95-104.
- [62] 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等, 2008. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义[J]. 西南石油大学学报 (自然科学版) (05): 22-26.

