



地学前缘  
*Earth Science Frontiers*  
ISSN 1005-2321,CN 11-3370/P

## 《地学前缘》网络首发论文

题目：双重介质致密砂岩变岩电参数饱和度模型：以川西新场气田须二段为例  
作者：屈林博，岳大力，王武荣，金武军，赖合川，武清钊，廖昌珍，付家麟，张佳睿，李伟  
DOI：10.13745/j.esf.sf.2025.8.55  
收稿日期：2025-08-05  
网络首发日期：2025-08-19  
引用格式：屈林博，岳大力，王武荣，金武军，赖合川，武清钊，廖昌珍，付家麟，张佳睿，李伟. 双重介质致密砂岩变岩电参数饱和度模型：以川西新场气田须二段为例[J/OL]. 地学前缘. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.8.55>



**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。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.8.55

# 双重介质致密砂岩变岩电参数饱和度模型：以川西新场气田须二段为例

屈林博<sup>1,2</sup>, 岳大力<sup>1,2,\*</sup>, 王武荣<sup>1,2</sup>, 金武军<sup>3</sup>, 赖合川<sup>1,2</sup>, 武清钊<sup>3</sup>,  
廖昌珍<sup>3</sup>, 付家麟<sup>1,2</sup>, 张佳睿<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>

1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 102249
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

QU Linbo<sup>1,2</sup>, YUE Dali<sup>1,2,\*</sup>, WANG Wurong<sup>1,2</sup>, JIN Wujun<sup>3</sup>, LAI  
Hechuan<sup>1,2</sup>, WU Qingzhao<sup>3</sup>, LIAO Changzhen<sup>3</sup>, FU Jialin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiarui<sup>1,2</sup>,  
LI Wei<sup>1,2</sup>

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
3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

QU Linbo, YUE Dali, WANG Wurong, et al. Variable rock-rlectrical saturation model for dual-medium tight sandstones: A case from the Xujiahe Formation, western Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*,

**Abstract:** The second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression holds substantial potential for tight sandstone gas exploration and development. However, the deeply buried reservoirs exhibit complex structures, low porosity and permeability, and a multi-phase superimposed fracture system, resulting in diverse reservoir types formed through fracture-matrix coupling. Conventional Archie-based water saturation models perform poorly in dual-porosity systems, causing low interpretation accuracy and hindering efficient development. This study integrates core observations, thin-section analyses, rock physics experiments, and well-logging data to classify reservoirs into three types: fractured, fracture-pore composite, and porous. Significant variations in pore structure and flow capacity among these types cause pronounced differences in petrophysical parameters. To address these differences, we developed a reservoir-classification-based saturation model with variable rock-electrical parameters. The model demonstrates strong agreement with measured water saturation from sealed core samples and gas testing results, yielding an average absolute error of 4.35%—a substantial improvement over the 50.25% error of the traditional Archie model. This research offers an effective approach for fluid saturation evaluation in dual-porosity tight sandstone reservoirs and a transferable pathway for analogous unconventional gas systems, ultimately contributing to enhanced reserve recovery and efficient development.

**Keywords:** dual-medium tight sandstone; reservoir classification; variable rock-electrical parameters; saturation model; the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation

**摘要:** 川西坳陷上三叠统须二段致密砂岩气藏的勘探开发潜力巨大, 但该地区埋藏较深、储层致密、构造复杂, 且断裂-裂缝系统多期叠加, 导致了裂缝与基质耦合作用下的多种储层类型。传统 Archie 含水饱和度解释模型在双重介质致密砂岩储层中适用性差、解释精度低, 制约了气藏的高效开发。本文综合岩心观察、薄片分析、岩石物理实验及测井数据, 将储层划分为裂缝型、裂缝-孔隙复合型和孔隙型 3 类。研究表明, 不同储层类型的储集空间与渗流能力存在显著差异, 导致了岩电参数的明显分异。本文通过优化岩电参数, 构建了基于储层分类的变岩电参数饱和度解释模型。该模型计算结果与密闭岩心实测含水饱和度值及试气结果高度一致, 平均绝对误差仅为 4.35%, 显著优于传统 Archie 模型的 50.25%。本研究为双重介质致密砂岩储层流体饱和度解释提供了一种有效的新方法, 为类似复杂孔隙结构的非常规气藏提供了可借鉴的技术路径与方法论支撑, 有助于提高双重介质致密砂岩储量动用程度和高效开发。

**关键词:** 双重介质致密砂岩; 储层分类; 变岩电参数; 饱和度模型; 上三叠统须二段

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

收稿日期: 2025-08-05; 修回日期: 2025-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272186, 42302128, 42472179); 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462023YJRC039)

作者简介: 屈林博(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能油气藏表征与建模。E-mail: 2023315010@student.cup.edu.cn。

\*通信作者简介: 岳大力(1974—), 男, 教授, 博士研究生导师, 从事油气田开发地质教学与科学研究工作, Email: yuedali@cup.edu.cn。

## 0 引言

致密砂岩气藏是非常规气藏中勘探开发的重点,在实际开发过程中,精确计算储层含水饱和度对于储量估算、流体识别、水淹层识别与开发方案调整具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。Archie 公式自 1942 年提出以来,因其结构简洁、物理意义明确,在含水饱和度测井解释中得到广泛应用,成为油气层识别的重要方法<sup>[4]</sup>。然而,随着非常规储层研究的深入,研究表明该模型在物性差、非均质性强的储层中适用性较差,常表现为饱和度解释结果与含气性测试不一致<sup>[5-7]</sup>。上述偏差主要源于致密砂岩储层相较常规砂岩储层物性更差、非均质性更强、孔隙结构更为复杂,致使岩石导电机理复杂化,进而导致电阻率增大率与含水饱和度之间呈现出非线性关系,即“非 Archie”现象<sup>[8-11]</sup>。尤其是在裂缝-基质耦合作用下的双重介质致密砂岩储层中,如何提高含水饱和度计算的精度,已成为当前亟需突破的关键技术难题。为解释复杂孔隙结构下的电性响应,部分学者基于不同孔隙类型的导电特性建立了双重孔隙模型<sup>[12-13]</sup>和三孔隙介质导电模型<sup>[14-16]</sup>,但因模型参数众多且难以精确获取,其工程适用性受到限制<sup>[17]</sup>。近年来,数字岩芯技术的发展为数值模拟岩石导电规律提供了新途径,但高昂的成本和对复杂孔隙的简化处理限制了其广泛应用<sup>[18-19]</sup>。在此基础上,通过优化岩电参数以适应致密砂岩储层评价成为常用手段<sup>[6-7]</sup>。相较而言,基于岩心实验与储层参数分析构建的新型饱和度模型结构更为简洁,参数易于获取,具有更广泛的适用性。尽管已有部分研究尝试引入变岩电参数模型以应对致密储层的非线性电性响应,但多数模型未能充分考虑储层类型与孔隙结构差异的耦合效应,尤其是裂缝对孔隙结构的控制作用常被忽略,目前针对裂缝-孔隙协同导电的岩电参数优化研究尚属空白,限制了双介质储层含水饱和度解释的精度提升。

川西坳陷上三叠统须家河组二段致密砂岩气藏具备良好的资源基础与广阔的勘探开发前景<sup>[20-21]</sup>。然而,该区储层埋藏深,物性差,构造样式复杂,断裂-裂缝系统多期叠加,致使储层非均质性显著增强,形成了多种储层类型<sup>[22]</sup>。此外,储层中广泛发育天然微裂缝,不仅作为油气的重要储集空间与渗流通道,还对储层的电性响应特征产生显著影响,从而加剧了含水饱和度解释的不确定性。精确计算双重介质致密砂岩的含水饱和度对于储量评估、产能预测及开发方案优化具有重要意义,是提升气田开发效率和经济效益的关键。针对川西坳陷复杂地质背景,本文首次引入裂缝-基质协同作用下的储层分类约束,结合实验测试与回归分析方法,构建了适用于不同储层类型的岩电参数体系,进而建立了双介质条件下的高精度含水饱和度解释模型。本研究为双重介质致密砂岩储层流体饱和度解释提供了一种有效的新方法,同时为类似复杂孔隙结构的非常规气藏提供了可借鉴的技术路径与方法论支撑。

## 1 地质概况

川西坳陷位于四川盆地西北部,地处龙门山冲断带东南侧,属于典型的前陆盆地(图 1 a<sup>[27]</sup>)。坳陷整体呈北东-南西向展布,主要由成都凹陷、梓潼凹陷、龙门山前推覆带、知新场构造带和新场构造带六个不同的构造单元组成<sup>[22-23]</sup>。其中新场气田位于川西坳陷中段的新场构造带中部,构造格局整体呈南陡北缓,发育 NEE 向长轴的长垣式背斜构造(图 1 b<sup>[27]</sup>)。研究区经历了印支期、燕山期、喜山早期及晚期等多期构造运动<sup>[24,25]</sup>,形成了多期褶皱及断裂相互叠合的复杂构造格局。区内主要发育近南北向与东西向两组逆断层(图 1 c)。其中,近东西向断裂主要形成于印支晚期,新场东部发育的近北东向断裂多形成于燕山中晚期,而近南北向断裂主要形成于喜山期<sup>[26]</sup>。多期褶皱与断裂活动叠加使得新场构造带内发育大量的断裂与天然裂缝,为油气的富集提供了良好的构造条件。

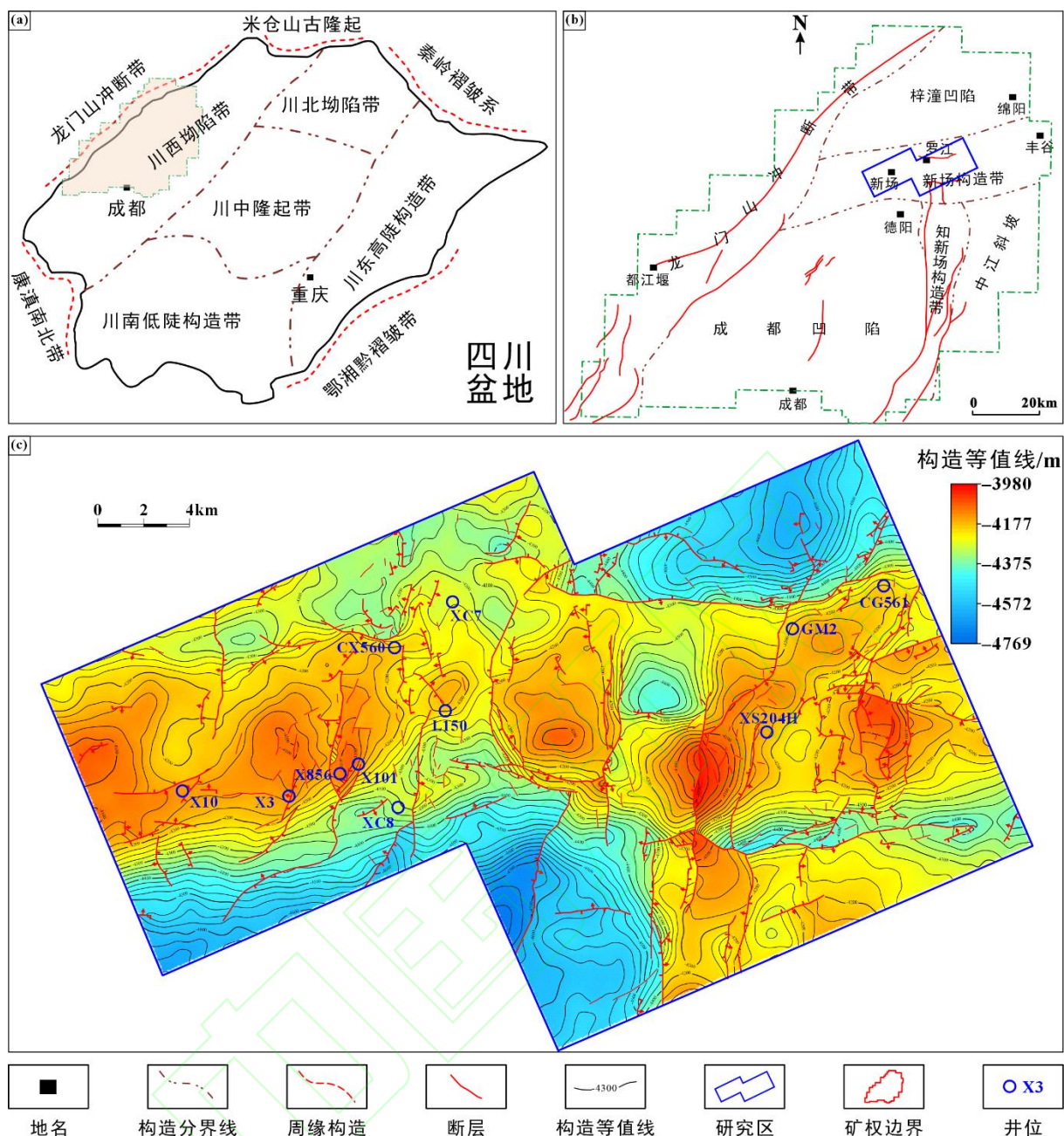


图 1 研究区区域地质概况图 (图 1a、b 据[27]修改)

Fig.1 Regional Geological Setting of the Study Area ((a) and (b) modified from[27])

研究区须二段沉积时期发育一套以浅水辫状河三角洲相为主的沉积体系, 受频繁湖平面变动控制, 河道砂体多期叠置, 形成复合河道, 纵向上砂泥岩交替发育<sup>[28]</sup>。尽管研究区部分高渗储层受到裂缝改造, 但整体储层物性较差, 须二段储层平均孔隙度仅为 3.7%, 平均基质渗透率  $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属于特低孔、特低渗-致密储层<sup>[29]</sup>。储层非均质性极强, 严重制约了含水饱和度的精确解释与储层精细评价工作<sup>[30]</sup>。

## 2 致密砂岩储层类型及储集空间差异特征

### 2.1 储层类型划分

须家河组二段储层表现出强烈的非均质性, 尤其是在近断层区域, 裂缝发育显著, 形成了复杂的多类型储层。裂缝不仅增强了致密储层的渗流能力, 还沟通了不同储集单元, 在一定程度上控制了优质储层的分布格局与天然气富集位置<sup>[28]</sup>。鉴于裂缝的关键控制作用, 本文综合岩心观察与微电阻率成像测井识别了宏观裂缝分布, 结合裂缝发育强度与基质孔隙发育特征, 将研究区储层划分为裂缝型储层、裂缝

-孔隙复合型储层、孔隙型储层 3 种类型，明确了研究区不同储层类型的差异特征。

裂缝型储层储集空间以裂缝为主，主要发育低角度缝（倾角<45°）和平缝（倾角≤10°）。在测井上表现为低伽马射线值、双侧向测井曲线为正幅度差，整体均较低、声波时差明显增大的特征。微电阻率成像测井常见清晰的深色正弦曲线，表明裂缝开度较大，反之当裂缝开度较低时，正弦线会不连续。若裂缝被方解石充填，则呈高电阻率表现，渗流能力受限（图 2）。

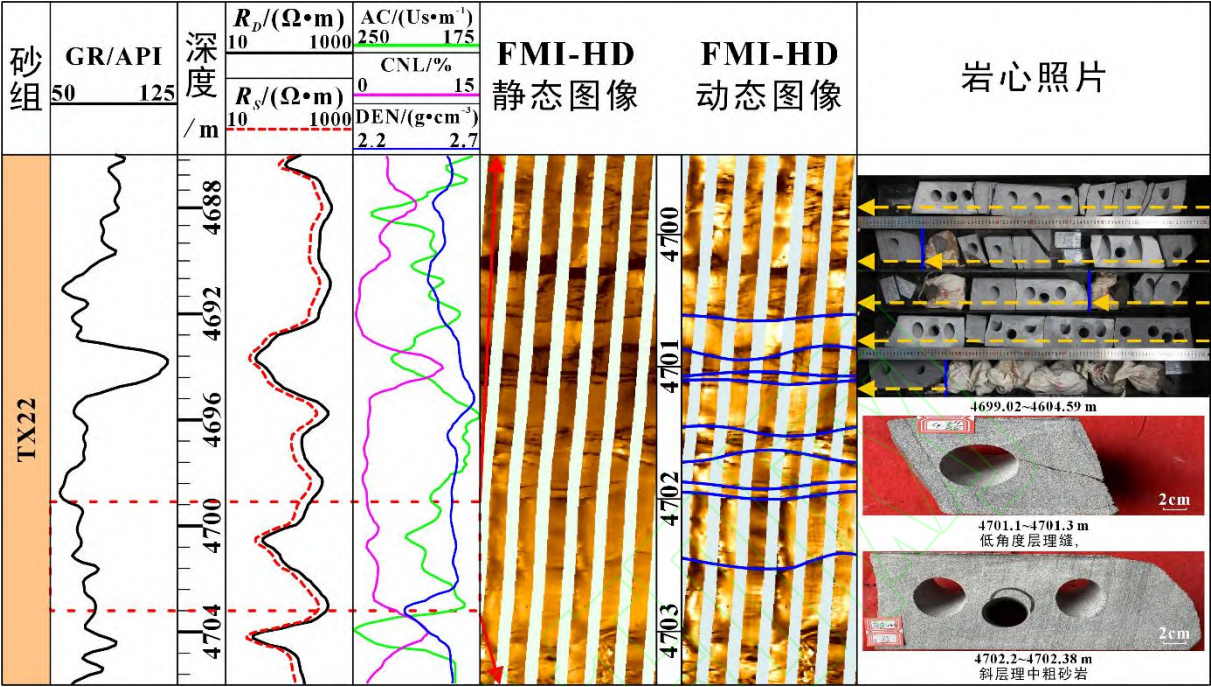


图 2 裂缝型储层类型及特征（XS204H，4 686~4 706 m）

Fig.2 Fractured reservoir type and characteristics (well XS204H, 4 686~4 706 m)

裂缝-孔隙复合型储层既发育裂缝，又具备良好的基质孔隙空间，与裂缝型储层相比具有更强的储集能力。该类储层主要发育低角度缝与平缝，叠加发育高角度缝（倾角 60°~80°），形成网状缝（图 3）。电成像测井图像中，裂缝呈多角度交汇状，开度较大，构成高渗透性储集通道。钻井岩屑录井中常见透明-半透明、自形-半自形石英次生矿物，亦反映该类储层良好的渗透性。测井响应特征表现为低伽马射线值，双侧向测井曲线突变，电阻率显著降低；密度、中子孔隙度及声波时差的同步升高进一步反映了孔隙度的增加

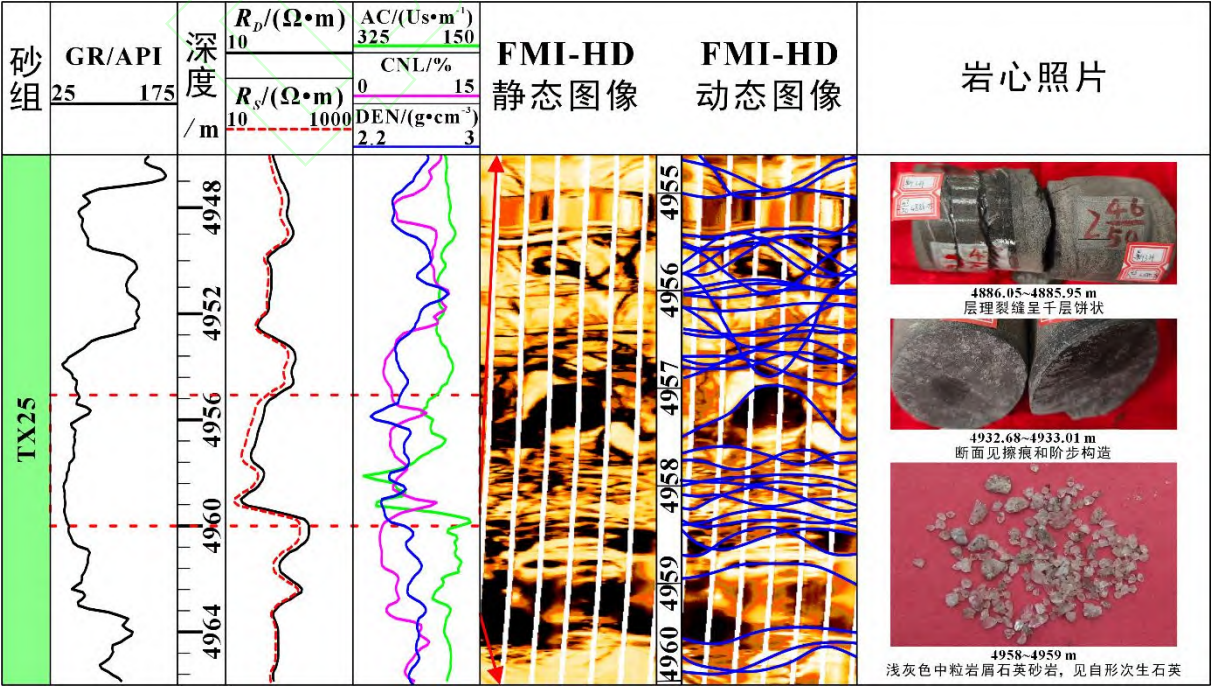


图3 裂缝-孔隙复合型储层类型及特征 (X3, 4 946~4 966 m)

Fig.3 Fracture-pore composite reservoir type and characteristics (well X3, 4 946~4966 m)

孔隙型储层（亦称基质型储层）以碎屑颗粒间孔隙为主要储集空间，渗流通道主要为孔隙之间的喉道。该类储层裂缝发育稀少，整体物性较差，渗流能力明显低于前两类储层。但在部分高能河道沉积背景下，绿泥石衬边结构有助于残余粒间孔的保存，使孔喉半径相对增大，仍被视作较优质储层。其测井响应特征表现为较低伽马射线值、中-高电阻率值，双侧向曲线呈正幅度差。电成像测井图像中通常未见明显裂缝或断裂发育（图4）。

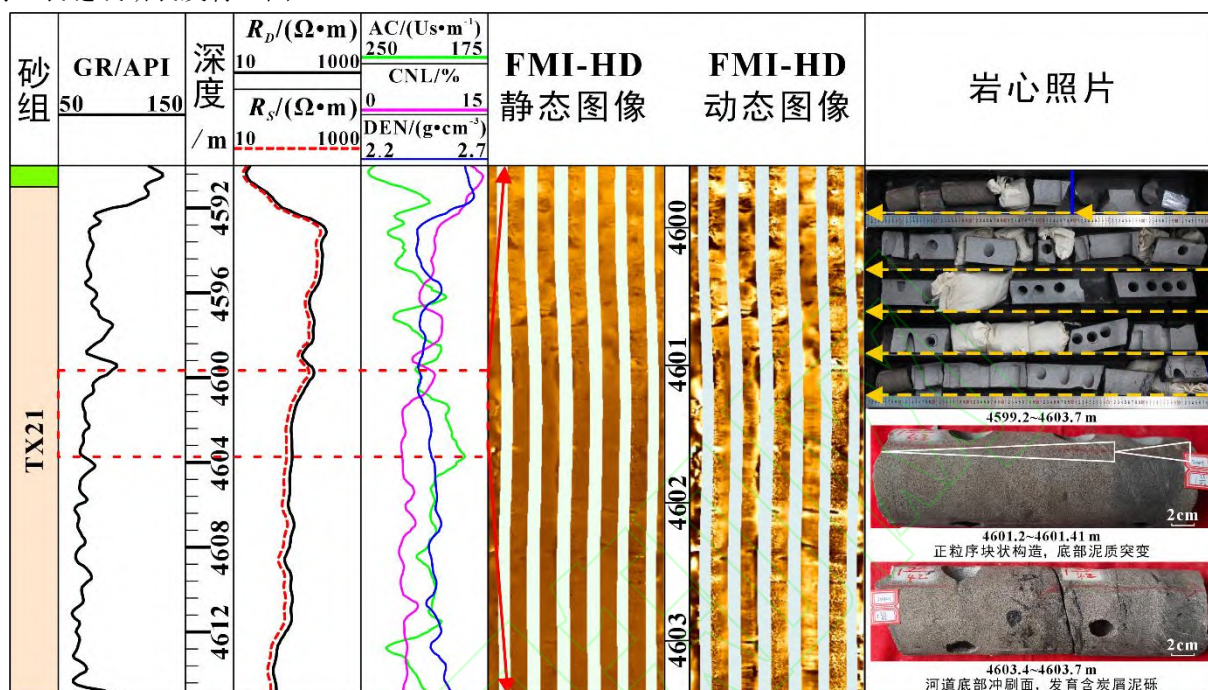


图4 孔隙型储层类型及特征 (XS204H, 4 590~4 615 m)

Fig.4 Pore-type reservoir type and characteristics (well XS204H, 4 590~4 615 m)

## 2.2 不同储层类型储集空间差异特征

在基于测井资料与岩心观察识别储层宏观结构差异的基础上，为了进一步揭示不同储层类型在微观尺度下的储集空间差异特征，本文通过结合铸体薄片、压汞实验和核磁共振测试等多种手段，对微裂缝、孔喉结构及可动流体分布特征进行定量分析。已有研究表明，通过对离心前后  $T_2$  谱曲线形态的对比，可有效识别不同孔隙尺度下的可动流体分布特征，其中  $T_2 \leq 1\text{ms}$ 、 $1\text{ms} < T_2 \leq 10\text{ms}$ 、 $10\text{ms} < T_2 \leq 100\text{ms}$ 、 $100\text{ms} < T_2 \leq 1000\text{ms}$  分别指示微小孔隙、中孔、大孔和微裂缝特征<sup>[31]</sup>。在研究区须二段致密砂岩储层中，在经历强烈压实作用后，储层孔隙度与渗透率整体偏低，表现出典型的致密特征。无论是裂缝型储层、裂缝-孔隙复合型储层，还是孔隙型储层，其中微小孔隙（ $T_2 \leq 1\text{ms}$ ）中几乎不含可动流体，表明其对流体的储集和运移贡献极为有限。

裂缝型储层的基质孔隙发育程度较低，储集空间主要为裂缝，孔隙度通常小于 3%。由于裂缝对基质孔隙的连通作用，此类储层的渗透率表现较好，普遍大于 0.03mD，多数情况下甚至大于 1mD，是研究区较优质的储层类型。然而由于缺乏大孔隙，导致其排驱压力最高，孔喉半径中值较小，退汞曲线中常出现部分垂直段。得益于裂缝对孔隙的连通，其进汞饱和度相对较高，甚至能够达到 80%以上（图 5）。裂缝-孔隙复合型储层在微裂缝与大孔隙的共同作用下，具有最高的可动流体饱和度。与裂缝型储层不同，该储层微裂缝广泛发育，其基质孔隙类型主要为粒间溶孔与粒内溶孔，孔隙度普遍大于 3%，渗透率通常大于 0.03mD，多数高于 1mD。微裂缝有效地沟通了发育良好的基质孔隙，形成了有利的渗流系统，使其成为研究区最优质、分布最广泛的主力储层。该类储层孔喉半径分布较为宽泛，孔喉中值半径较大，排驱压力较低，无效微孔占比较少，孔隙连通性良好，最大进汞饱和度普遍介于 70%~80%。相比之下，裂缝型储层虽然具有较为宽大的裂缝，但储集空间有限，可动流体主要存在中孔及微裂缝中（图 5）。孔隙型储层以碎屑颗粒间孔隙为主要储集空间，渗流通道为孔隙之间的喉道。整体物性相对较差，由于几

乎不发育裂缝，渗流能力明显低于上述两种储层。其可动流体仅赋存在中-大孔中，饱和度整体较低。此类储层的孔喉半径分布受控于储层质量，在部分高能河道中存在绿泥石衬边结构，基质储层残余粒间孔的发育导致孔喉半径相对较大。整体而言，孔隙型储层的排驱压力最低，最大进汞饱和度最大，通常大于 70%（图 5）。

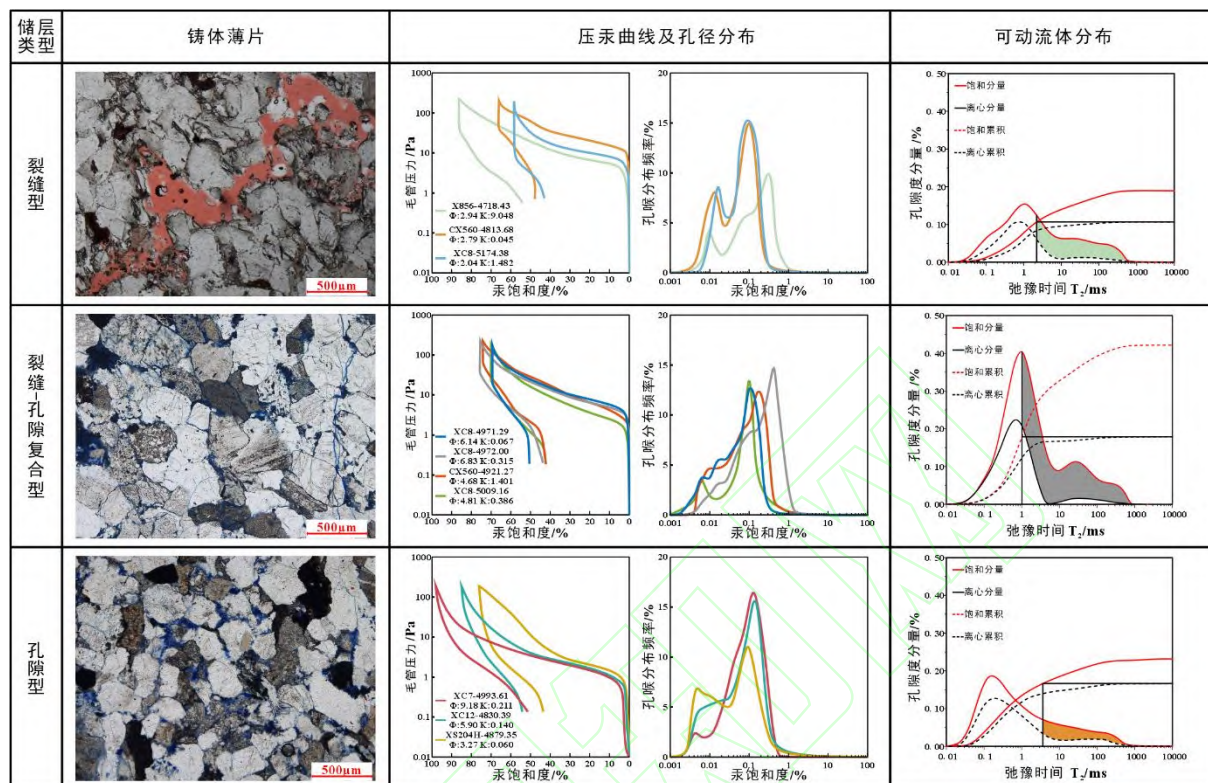


图 5 不同储层类型孔隙结构差异特征  
Fig.5 Differences in pore structure among reservoir types

### 3 储层孔隙结构对岩电参数的影响

阿尔奇公式建立了岩石电阻率与孔隙度、含水饱和度之间的实验关系<sup>[4]</sup>，认为在 100%含水的纯石英砂岩中，岩性有关的系数  $a=b=1$ ，胶结指数和饱和度指数  $m=n=2$ 。则该模型表达式为：

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (\text{公式 1})$$

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b}{S_w^n} \quad (\text{公式 2})$$

式中： $a, b$ —与岩性有关的常数，无量纲； $m$ —胶结指数，无量纲； $n$ —饱和度指数，无量纲； $R_w$ —地层水电阻率， $\Omega \cdot m$ ； $R_o$ —100%饱和和地层水的岩石的电阻率， $\Omega \cdot m$ ； $R_t$ —地层电阻率， $\Omega \cdot m$ ； $R_t$ —是孔隙度， $I$ —电阻增大系数。

针对新场气田须二段致密砂岩储层非均质性强、不同储层物性与电性差异显著的问题，在明确不同储层类型及其测井响应特征的基础上，选取研究区须二段 49 块致密砂岩样品开展岩电实验，系统分析了不同储层类型的岩电响应差异。由于致密砂岩储层孔隙结构复杂，其  $F-\phi$  关系相较常规储层更为特殊。在双对数坐标系下，研究区储层的孔隙度与地层因素之间呈现明显的“非阿尔奇”特征（图 6 a），胶结指数  $m$  变化范围较大，介于 1.30~1.99。同样，含水饱和度与电阻率增大率的关系也表现出高度不稳定性（图 6 b），饱和度指数  $n$  介于 1.796~3.603，进一步反映了不同储层内部孔隙结构与流体分布的复杂性。

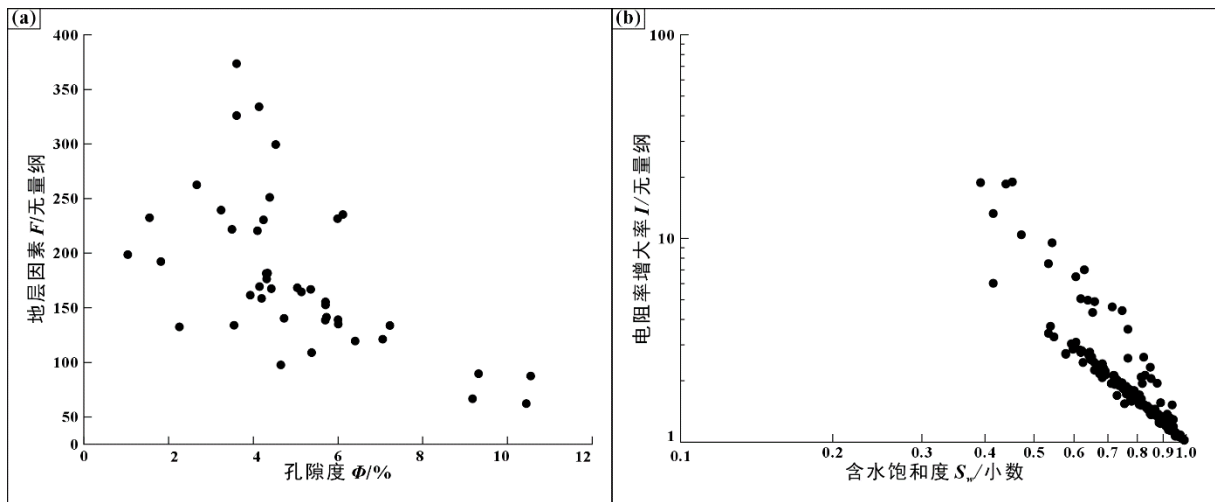


图 6 研究区致密砂岩岩电响应关系图

Fig. 6 Rock-electrical response characteristics of tight sandstones in the study area

在明确不同储层类型孔隙结构差异的基础上，对研究区所有样品的取样深度进行归位处理。统计结果表明，胶结指数  $m$  与测井曲线及储层物性参数之间具有较好的相关性（图 7），其中与孔隙度的相关性最为显著。因此，基于测井曲线建立胶结指数  $m$  的解释模型具有较强的可行性。已有研究指出，在复杂孔隙结构的储层中，岩石电阻系数  $F$  与孔隙度  $\Phi$  在双对数坐标系下呈非线性关系，通常  $m$  与  $\lg\Phi$  呈二次函数关系<sup>[7]</sup>。本文分别建立了  $m$  与  $\lg\Phi$  的拟合模型（公式 3）及基于测井曲线的多元逐步回归模型（公式 4），各模型的表达式如下：

$$m = 0.0037\lg\Phi^2 + 0.7169\lg\Phi + 2.6164 \quad R^2 = 0.7702 \quad (\text{公式 3})$$

$$m = 0.623\Phi - 2.786R_D - 0.18RQI - 0.04AC - 0.151GR \quad R^2 = 0.7916 \quad (\text{公式 4})$$

式中： $\Phi$  为孔隙度，小数； $K$  为渗透率，mD； $R_D$  为深侧向电阻率， $\Omega$ ； $GR$  为自然伽马，API； $RQI$  为储层品质因子，无量纲。

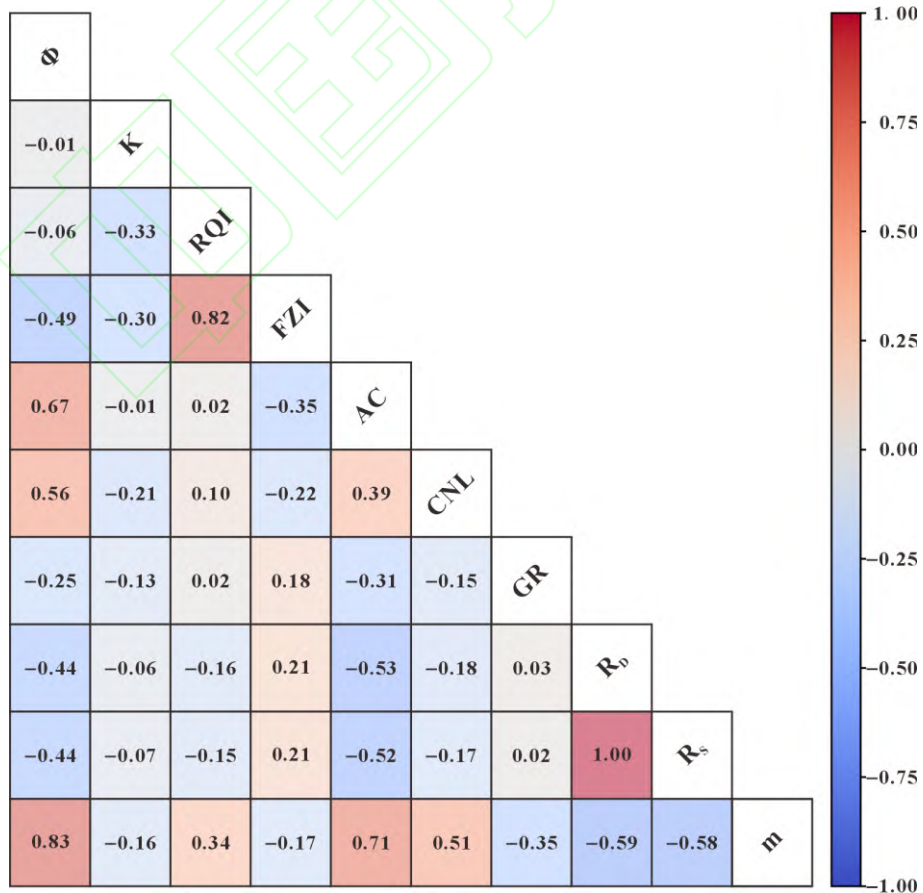


图 7 胶结指数  $m$  与各参数的相关系数矩阵图

Fig. 7 Correlation matrix between cementation exponent  $m$  and related parameters

对比各模型的计算结果可知,两种模型所计算的计算  $m$  值与原始  $m$  值的相关性差异较小,但整体拟合误差偏大(图 8a, b),其中裂缝-孔隙复合型储层与裂缝型储层的样品误差最为显著,而孔隙型储层的误差相对较小。该结果表明,在整体强压实作用下的较致密储层中,裂缝发育是影响胶结指数变化的重要因素,裂缝控制下形成的复杂孔隙结构使得常规方法存在较大局限性。由于不同类型储层的孔隙结构存在显著差异,其岩石物理特性亦存在本质区别,将不同类型数据混合拟合是导致模型预测精度较低的主要原因之一。为提升胶结指数的预测精度,本文进一步引入储层分类约束开展拟合分析。无论采用基于储层分类的二次函数拟合,还是多元逐步回归模型,均在有效降低了胶结指数  $m$  的预测误差,且与实测值的相关性显著优于未分类数据(图 8c, d)。其中,基于测井曲线构建的多元分类逐步回归模型在  $m$  值预测中表现出更高的拟合优度,预测结果更接近原始  $m$  值,优于  $m$  与  $\lg\Phi$  的单变量拟合模型。

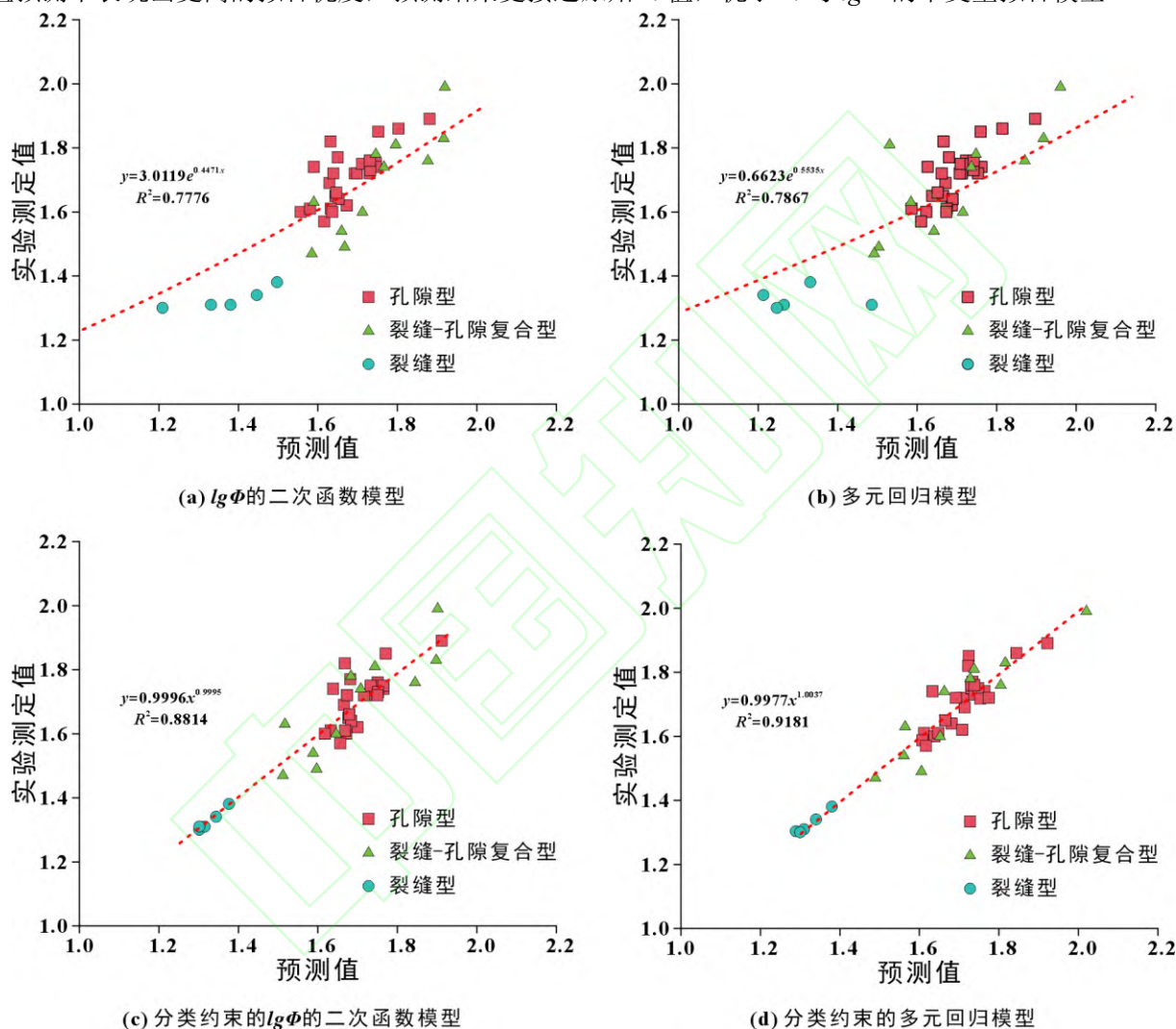


图 8 不同模型基于实验测定胶结指数与计算值散点图

Fig. 8 Scatter plots of measured vs. calculated cementation exponent  $m$  from different models

饱和度指数  $n$  主要受储层所处的压力、温度、地层水矿化度、孔隙结构差异及岩石颗粒的润湿性等关键因素的影响<sup>[6,8,32-33]</sup>。在同一地区的储层中,压力和地层水矿化度整体差异较小,而川西须家河组致密储层普遍具有较强的亲水性,岩石颗粒润湿性变化也较小,因此  $n$  值的主要影响因素为孔隙结构差异。不同储层类型具有不同的孔隙结构特征,这对岩电参数产生显著影响。

通过对不同储层类型的电阻增大率  $I$  与含水饱和度  $S_w$  数据进行拟合分析发现,实验数据在双对数坐标下呈现出明显的类型差异(图 9),进一步说明在同一区块内,回归得到的饱和度指数  $n$  并非固定值,而是受储层孔隙结构差异所控制。因此,为提高利用阿尔奇公式或其变形公式计算含水饱和度  $S_w$  的准确性,应基于储层类型优化岩电参数,得到与之相匹配的岩电参数,以提高含水饱和度  $S_w$  的计算精度。

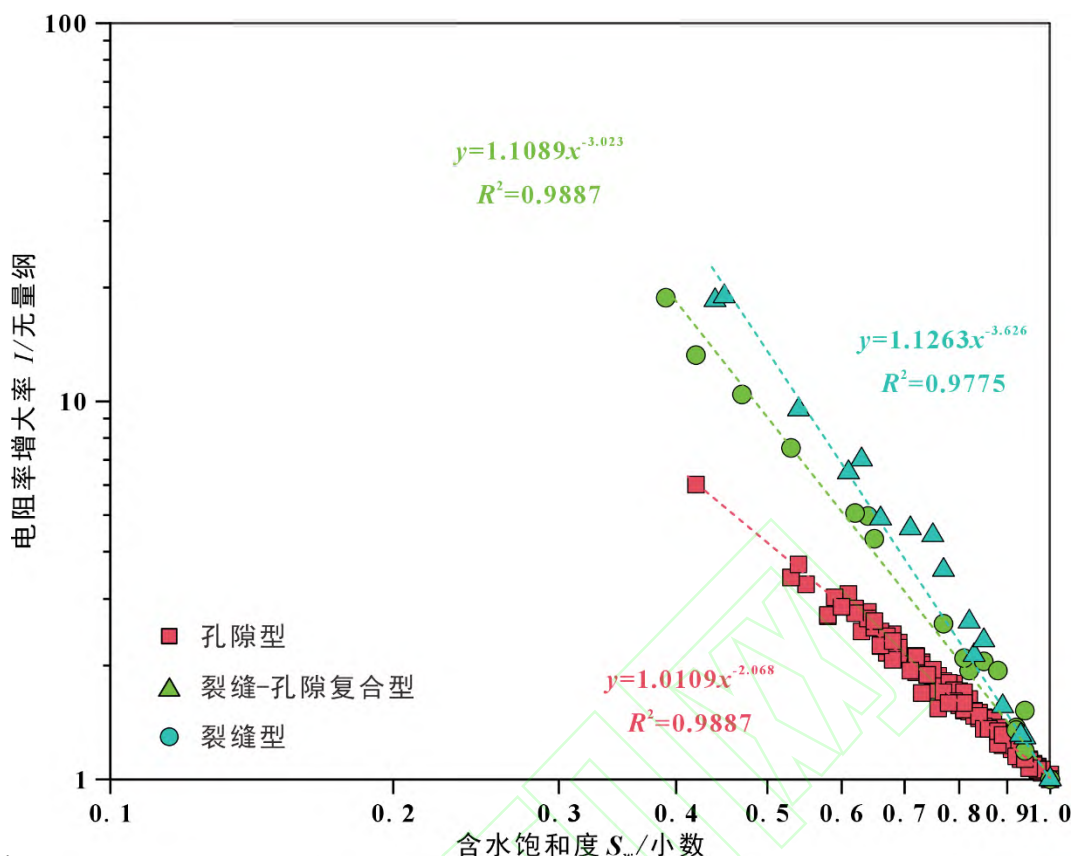


图 9 岩心含水饱和度与电阻率增大率关系图

Fig. 9 Relationship between core-measured water saturation and resistivity increase rate

#### 4 基于储层类型的变岩电参数饱和度模型

针对新场气田须二段致密砂岩储层非均质性强、不同储层物性与电性差异显著的问题，在明确不同储层类型及其测井响应特征的基础上，选取典型样品对不同储层类型开展岩电实验，明确了不同储层类型的岩电差异，分储层类型建立了变岩电参数的测井含水饱和度模型（表 1）。

表 1 基于储层分类的变岩电参数饱和度模型

Table 1 Variable rock-electrical parameter saturation models based on reservoir classification

储层类型	变岩电参数含水饱和度计算公式	胶结指数 $m$ 计算公式	饱和度指数 $n$	岩性指数 $b$
裂缝型储层	$S_w = \left( \frac{b_1 R_w}{\Phi^{m_1} R_t} \right)^{\frac{1}{n_1}}$	$m_1 = 0.69\Phi - 0.12R_D - 0.33RQI - 0.05AC - 0.17GR$	$n_1 = 3.626$	$b_1 = 1.1263$
裂缝-孔隙复合型储层	$S_w = \left( \frac{b_2 R_w}{\Phi^{m_2} R_t} \right)^{\frac{1}{n_2}}$	$m_2 = 1.23\Phi - 0.34R_D - 0.33RQI - 0.14AC - 0.41GR$	$n_1 = 3.023$	$b_2 = 1.1089$
孔隙型储层	$S_w = \left( \frac{b_3 R_w}{\Phi^{m_3} R_t} \right)^{\frac{1}{n_3}}$	$m_3 = 0.69\Phi - 0.16R_D + 0.05RQI + 0.51AC$	$n_3 = 2.068$	$b_3 = 1.0109$

通过岩心观察和微电阻率成像测井资料对四川盆地新场气田 XS204H 井须二段储层完成了分类，基于不同储层类型的变岩电参数关系进行了精细的饱和度测井综合评价解释。选取具备试气资料及岩心含水饱和度化验数据的 TX21、TX22 和 TX23 砂组作为对比对象，开展饱和度解释分析。其中所用岩心为密闭取心，以确保岩心含水饱和度数据的准确性（图 10）。此外，由于新场须二段地层水整体为封闭性良好的高矿化度  $\text{CaCl}_2$  型地层水，剔除不稳定样品后各井目的层地层水矿化度整体差别不大，因此可以使用地层水样进行地层水矿化度的计算。通过测定等效  $\text{NaCl}$  溶液质量浓度的地层水电阻率，依据经验公式将实验室测定的电阻率值转换到地层温度下的地层水电阻率<sup>[34]</sup>（公式 5）。

$$R_w = \left[ 0.559 \ 65 + \frac{165 \ 963.07}{C_{\text{NaCl}}} \right] \times c[T + 21.5] \quad (\text{公式 5})$$

式中： $R_w$ 为地层温度下的地层水电阻率， $\Omega$ ； $C_{\text{NaCl}}$ 为等效  $\text{NaCl}$  溶液质量浓度， $10^{-6}$ ； $T$ 为地层温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

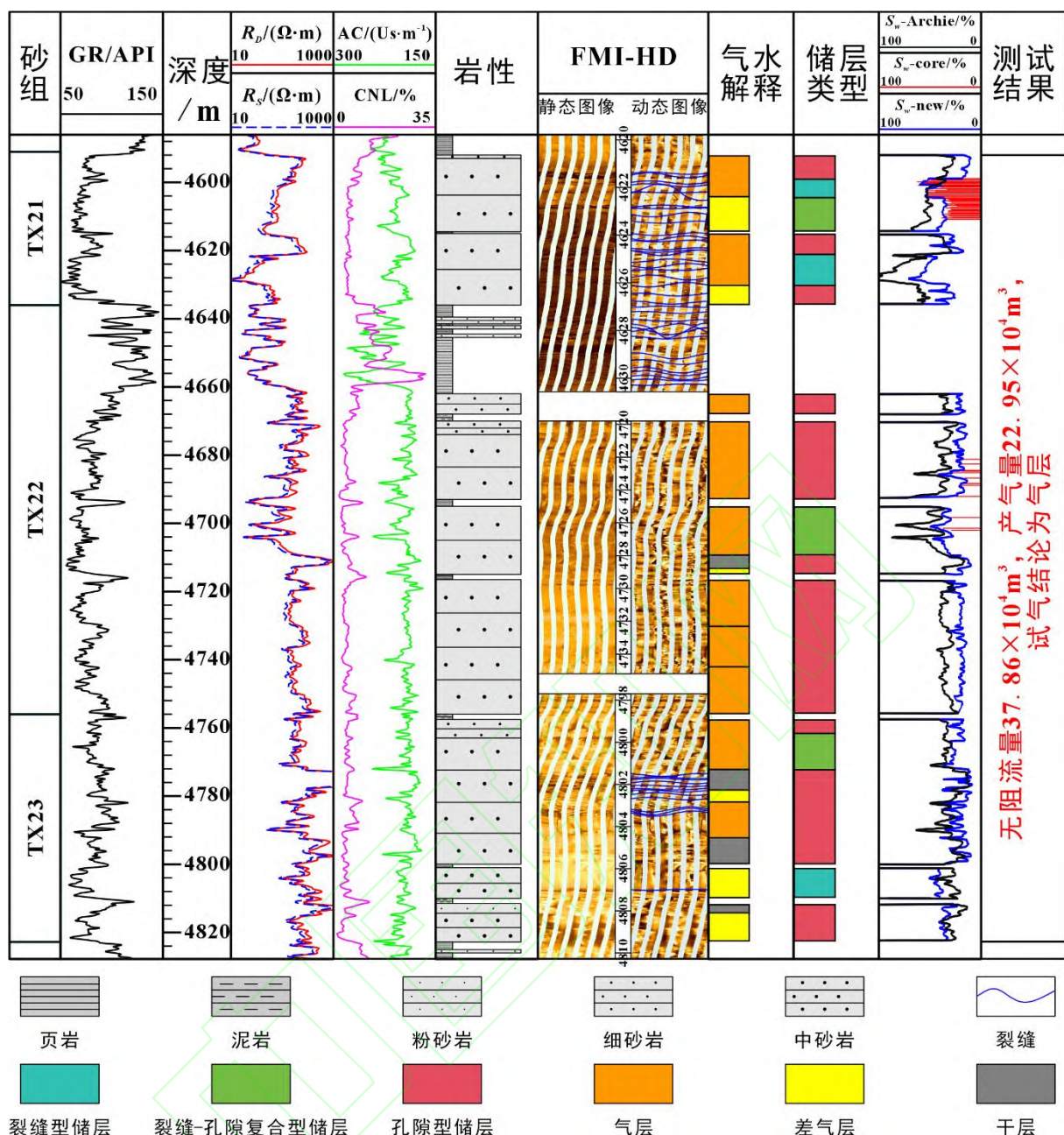


图 10 XS204H 井储集层测井综合评价成果图

Fig. 10 Integrated logging-based reservoir evaluation results for well XS204H

新方法计算的含水饱和度以蓝色曲线 ( $S_{w\text{-new}}$ ) 表示, 传统方法采用固定  $m$  和  $n$  值的 Archie 公式计算所得结果为黑色曲线 ( $S_{w\text{-Archie}}$ ), 密闭岩心实测含水饱和度数据以红色柱状曲线 ( $S_{w\text{-core}}$ ) 表示。对比计算结果与密闭岩心实测数据可知, 基于储层分类的变岩电参数法计算的含水饱和度与岩心分析结果更为接近, 具有更小的相对误差和绝对误差。尤其在绝对误差方面, 新方法计算的含水饱和度绝对误差主要分布在 10% 以内, 平均绝对误差仅为 4.35%; 而传统 Archie 公式法的平均绝对误差高达 50.25%。因此, 基于储层分类的变岩电参数法相比于传统 Archie 公式法针对双重介质储层具有更好的适用性, 计算平均误差降低了 44.72% (图 11), 显著提升了含水饱和度计算的准确性。

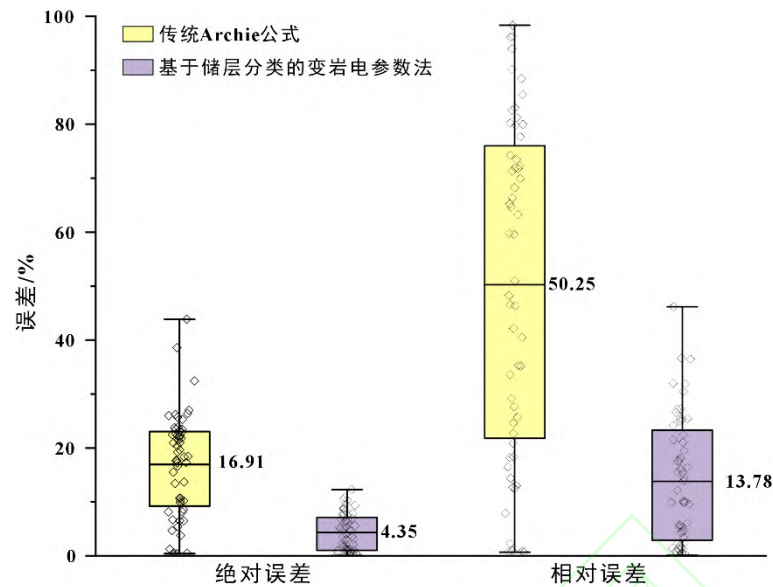


图 11 不同方法计算含水饱和度结果误差对比

Fig. 11 Error Comparison of Water Saturation Results Calculated by Different Methods

## 5 结论

(1) 通过对新场构造带须二段致密砂岩储层的岩心观察与微电阻率成像测井分析, 依据裂缝发育情况将研究区储层划分为裂缝型储层、裂缝-孔隙复合型储层、孔隙型储层共 3 种类型, 明确了研究区不同储层类型的差异特征, 不同储层类型的可动流体分布及含岩电参数具有显著差异。

(2) 在整体强压实作用下的较致密砂岩储层中, 裂缝发育是影响岩电参数的重要因素。由于不同类型储层的孔隙结构存在显著差异, 建立与储层类型相匹配的岩电参数关系, 可以有效提高含水饱和度计算的精度。

(3) 实例分析表明, 基于致密砂岩储层分类的变岩电参数法显著提高了含水饱和度计算精度, 平均绝对误差为 4.35%, 远低于传统 Archie 公式的 50.25%, 相较之下, 平均误差降低达 44.72%, 在双重介质储层中具有更优的适用性。

## 参考文献

- [1] MALEKIMOSTAGHIM E, GHOLAMI R, REZAEI R, et al. A laboratory-based approach to determine archie's cementation factor for shale reservoirs[J/OL]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2019, 183: 106399.
- [2] GUO J, ZHANG Z, ZHANG C, et al. Enhanced water saturation evaluation method using an improved electrical efficiency model: a case study of the mishrif formation, iraq[J/OL]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 236: 105656.
- [3] 胡国农,郝世彦,樊平天,等.鄂尔多斯盆地 NNW 油区再开发潜力分析[J].地学前缘,2023,30(1):106-115.
- [4] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J/OL]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [5] 孙建孟, 王克文, 李伟. 测井饱和度解释模型发展及分析[J]. 石油勘探与开发, 2008(1): 101-107.
- [6] 李霞, 李潮流, 李波, 等. 致密砂岩岩电响应规律与饱和度评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 202-212.
- [7] 卢俊辉, 张小莉, 杨振, 等. 致密砂岩储层变岩电参数法饱和度计算模型: 以苏里格气田西区盒 8 段为例[J/OL]. 现代地质, 2022, 36(4): 1131-1137.
- [8] 张帆, 闫建平, 李尊芝, 等. 碎屑岩阿尔奇公式岩电参数与地层水电阻率研究进展[J/OL]. 测井技术, 2017, 41(2): 127-134.
- [9] 游利军, 吴需要, 康毅力, 等. 致密砂岩电学参数的非阿尔奇现象[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2226-2231.
- [10] SHAH S A, SHAH S H, BIBI A, et al. Petrophysical evaluation using the geometric factor theory and comparison with archie model[J/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 82: 103465.
- [11] TIAN J, WANG L, OSTADHASSAN M, et al. Pore structure exponent of archie's law in a dual-porosity medium: vuggy reservoirs[J/OL]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 234: 212659.
- [12] ved models for petrophysical analysis of dual porosity reservoirs[J]. Petrophysics - the SPWLA Journal, 2003, 44(1):21-35.
- [13] 王谦. 致密砂岩饱和度模型与含水率评价方法研究[D/OL]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021[2025-04-24].
- [14] TIAN J, SIMA L qiang, WANG L, et al. A novel triple-porosity model for fractured-vuggy reservoirs based on maxwell-garnett mixing rule[J/OL]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2022, 208: 109362.
- [15] AL-GHAMDI A, CHEN B, BEHMANESH H, et al. An improved triple-porosity model for evaluation of naturally fractured reservoirs \[J/OL\]. \*SPE Reservoir Evaluation & Engineering\*, 2011, 14(4): 377-384.
- [16] 漆立新, 樊政军, 李宗杰, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层三孔隙度测井模型的建立及其应用[J]. 石油物探, 2010, 49(5): 489-494, 19.
- [17] 潘保芝, 阿茹罕, 郭宇航, 等. 裂缝性岩石低频下复电阻率与饱和度关系研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3774-3787.
- [18] 范雨霏, 潘保芝, 郭宇航, 等. 利用数字岩心技术评价含黏土砂岩导电模型[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 919-926.
- [19] WANG S, TAN M, WANG X, et al. Microscopic response mechanism of electrical properties and saturation model establishment in fractured carbonate rocks[J/OL]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2022, 208: 109429.
- [20] 刘忠群, 徐士林, 刘君龙, 等. 四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 31-40.
- [21] 赵正望, 唐大海, 王小娟, 等. 致密砂岩气藏天然气富集高产主控因素探讨——以四川盆地须家河组

为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(7): 963-972.

- [22] 潘磊,杜红权,李雷涛,等.川东北元坝地区上三叠统须家河组天然裂缝发育特征与主控因素[J].地学前缘,2024,31(5):156-165.
- [23] 刘君龙, 刘忠群, 肖开华, 等. 四川盆地新场地区三叠系须家河组二段致密砂岩有利岩石相表征及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1111-1121.
- [24] 刘君龙, 孙冬胜, 纪友亮, 等. 川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1164-1178.
- [25] 管树巍,梁瀚,姜华,等.四川盆地中部主干走滑断裂带及伴生构造特征与演化[J].地学前缘,2022,29(6):252-264.
- [26] 马旭杰, 周文, 唐瑜, 等. 川西新场地区须家河组二段气藏天然裂缝形成期次的确定[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 15-19.
- [27] 刘君龙, 胡宗全, 刘忠群, 等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 852-862.
- [28] 刘君龙, 刘忠群, 刘振峰, 等. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 530-540.
- [29] 严焕榕, 詹泽东, 李亚晶, 等. 致密砂岩气藏高产富集规律研究: 以川西坳陷新场—合兴场须家河组二段气藏为例[J/OL]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 541-548, 576.
- [30] 李开发, 张楚越, 朱亮, 等. 低渗透砂岩有水气藏改建地下储气库可行性评价: 以四川盆地中坝气田须二段气藏为例[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(1): 32-38.
- [31] 王永诗, 高阳, 方正伟. 济阳坳陷古近系致密储集层孔喉结构特征与分类评价[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 266-278.
- [32] 张丽华, 潘保芝, 单刚义, 等. 阿尔奇公式中饱和度指数影响因素及特征概述[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(3): 1247-1256.
- [33] WUFENG, WENZHU, YAOCONG, et al. Numerical simulation of the influence of pore structure on resistivity, formation factor and cementation index in tight sandstone[J/OL]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2020, 94(2): 290-304.
- [34] 白松涛, 万金彬, 杨锐祥,等. 地层水电阻率评价方法综述[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 566-578.