

文章编号: 1671-1505(2025)03-0696-18 DOI: 10.7605/gdxb.2025.028

川东地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩 岩相类型及储集层特征*

陈 旺^{1,2} 王兴志^{1,2} 韦明洋^{1,2} 曾德铭^{1,2} 康家豪^{1,2}
李 阳^{1,2} 刘凯铭^{1,2} 李 钊³ 洪海涛³ 周红飞³

1 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500

2 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610051

摘 要 页岩储集层物性是页岩油气富集机理的关键, 为确定陆相页岩不同岩相类型的储集层物性及其主控因素, 以川东地区侏罗系东岳庙段页岩为研究对象, 在岩相划分的基础上, 利用扫描电镜、低温氮气吸附等手段, 研究其储集空间类型、储集层物性及主控因素。研究表明: (1) 川东地区东岳庙段陆相页岩矿物成分以黏土矿物和石英为主, 方解石次之, 并含少量长石、白云石、黄铁矿和菱铁矿。研究区页岩主要为高一中碳黏土质页岩(I₂)、含一中碳混合质页岩(II₁)、中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(II₂)和含—低碳泥质粉砂岩(III₂) 4类岩相。(2) 页岩的储集空间主要为微孔隙和微裂缝。前者主要为黏土矿物晶间孔, 次为有机质孔以及局部岩相中发育的介壳溶蚀孔; 后者主要为页理缝和介壳边缘缝。(3) 川东地区页岩中高有机质丰度(>1%)、高黏土矿物含量(>40%)和适量的碳酸盐矿物含量(8%~12%)有利于页岩孔隙的发育, 而高石英+长石矿物含量(>50%)和过高或过低的碳酸盐矿物含量(>12%或<8%)不利于页岩孔隙的发育。(4) 含—中碳粉砂(黏土)质混合质页岩(II₂)是最有利的储集层发育岩相, 高一中碳黏土质页岩(I₂)次之, 中—低碳混合质页岩(II₁)较差, 含—低碳泥质粉砂岩(III₂)最差。结合东岳庙段岩相纵向分布规律, 认为东二亚段中上部是川东地区储集层优选层位。

关键词 陆相页岩 岩相类型 储集层特征 东岳庙段 川东地区

第一作者简介 陈旺, 男, 1999年生, 西南石油大学在读硕士研究生, 研究方向为沉积学与储层地质学。
E-mail: chenwang0208@163.com。

通讯作者简介 王兴志, 男, 1964年生, 博士, 教授, 主要从事储层沉积学等方面的教学与研究工作。
E-mail: wxzswpu@163.com。

中图分类号: P618.130.2⁺1 文献标志码: A

Lithofacies types and reservoir characteristics of continental shale in the Dongyuemiao Member of Jurassic Ziliujing Formation, eastern Sichuan Basin

CHEN Wang^{1,2} WANG Xingzhi^{1,2} WEI Mingyang^{1,2} ZENG Deming^{1,2} KANG Jiahao^{1,2}

* 中国石油—西南石油大学创新联合体项目(编号: 2020CX050000)和四川省自然科学基金重点项目(编号: 24NSFSC0093)联合资助。[Co-funded by the Innovation Consortium Project between China National Petroleum Corporation and Southwest Petroleum University (No. 2020CX050000) and the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 24NSFSC0093)]

收稿日期: 2024-02-25 改回日期: 2024-05-31

LI Yang^{1,2} LIU Kaiming^{1,2} LI Yue³ HONG Haitao³ ZHOU Hongfei³

1 *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China*

2 *School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China*

3 *Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China*

Abstract The physical properties of shale reservoirs are crucial to the enrichment mechanism of shale oil and gas. This study focuses on investigating the reservoir's physical properties and the key factors controlling various lithofacies of continental shale in the Jurassic Dongyuemiao shale in the eastern Sichuan Basin. On the basis of lithofacies division, the research employs core observation, scanning electron microscope, low-temperature nitrogen adsorption, and other methods to analyze the reservoir space type, physical properties, and the primary controlling factors. The study findings reveal that: (1) The Dongyuemiao Member shale in the eastern Sichuan Basin are primarily composed of clay minerals and quartz, followed by calcite, and minor amounts of feldspar, dolomite, pyrite, and rhodochrosite. Four main lithofacies are identified in the study area: high-medium total organic carbon (TOC) argillaceous shale (I₂), medium TOC and TOC bearing mixed shale (II₁), medium-low TOC silt (argillaceous) mixed shale (II₂), and low TOC and TOC bearing argillaceous siltstone (III₂). (2) The shale reservoir space is mainly composed of micropores and microfractures. The micropores are dominated by intergranular pores between clay minerals, followed by pores within organic matter and, locally, shell dissolution pores. Microfractures mainly include bedding fractures and edge fractures around shell fragments. (3) High organic matter abundance (>1%), high content of clay minerals (>40%), and moderate carbonate mineral content (8%~12%) in the shale of the study area are conducive to pore development. In contrast, high quartz and feldspar mineral content (>50%) and either excessive or insufficient carbonate mineral content (>12% or <8%) hinder shale pore development. (4) Among the lithofacies types, the medium-low TOC silty (argillaceous) mixed shale (II₂) is the most favorable for reservoir development, followed by high-medium TOC argillaceous shale (I₂). The medium TOC and TOC bearing mixed shale (II₁) is less favorable, while the low TOC and TOC bearing argillaceous siltstone (III₂) is the least favorable. Based on the vertical distribution of lithofacies, the middle to upper intervals of the Dong 2 sub-member are identified as the most favorable reservoir development zones in the study area.

Key words continental shale, lithofacies types, reservoir characteristics, Dongyuemiao Member, eastern Sichuan Basin

About the first author CHEN Wang, born in 1999, is a master's student at Southwest Petroleum University. His research direction is sedimentology and reservoir geology. E-mail: chenwang0208@163.com.

About the corresponding author WANG Xingzhi, born in 1964, is a Ph.D. and professor. He is mainly engaged in teaching and research in reservoir sedimentology. E-mail: wxzswpu@163.com.

页岩油气是指赋存于富有机质页岩层系中的石油和以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气(邹才能等, 2010; 赵靖舟, 2012)。随着油气勘探开发领域的不断拓展, 页岩油气已成为中国能源战略的重要组成部分(邹才能等, 2013)。据美国能源署(EIA)和自然资源部初步估算, 中国

页岩油技术可开采量约 43.93×10^8 t, 页岩气技术可采资源量 21.8×10^{12} m³ (王倩茹等, 2020), 是未来油气勘探的重要接续领域。同时四川盆地是中国重要的油气产区, 其侏罗系页岩资源丰富, 具有良好的勘探潜力(赵文智等, 2023)。2020年3月底, 中国石化在川东复兴地区部署的涪页10HF井

在东岳庙段压裂测试日产气 $5.57 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、日产油量 17.6 m^3 ，取得了川东东岳庙段陆相页岩油气勘探的重大突破（舒志国等，2021）。

近年来，前人针对四川盆地自流井组陆相页岩的岩相划分（聂海宽等，2017；刘忠宝等，2019；康家豪等，2022；胡宗全等，2023；舒志国等，2024）、沉积环境及有机质富集（何江林等，2022）、储集层特征（曹香妮等，2019；刘浩天等，2020；刘忠宝等，2022；周圆圆等，2023；舒志国等，2024）等开展了较深入的研究，认为陆相页岩总体具有高黏土、高石英含量的特点，页岩中不同程度发育多种夹层（介壳灰岩夹层、粉细砂岩夹层），胡宗全等（2023）根据矿物三端元的岩相划分原则，认为东岳庙段主要发育黏土质页岩、（含）介壳灰质页岩等 5 种岩相；舒志国等（2024）根据夹层+矿物三端元的岩相划分原则，认为东岳庙段发育介壳韵律型混合页岩相、介屑纹夹层型黏土页岩相等 6 种岩相。储集层方面前人多认为东岳庙段以黏土矿物晶间孔和微裂缝为主，有机质孔次之（姜涛等，2021；刘忠宝等，2022）。也有学者认为东岳庙段页岩有机黏土复合体孔也是主要的孔隙之一（舒志国等，2024）。陆相页岩孔径多以 $2 \sim 50 \text{ nm}$ 的介孔为主，宏孔或微孔次之，孔隙形态以平行板状狭缝型孔隙、墨水瓶型孔为主（付小平和杨滔，2021）。

虽然四川盆地内侏罗系页岩油气的相关研究已日益深入，但不同地区的陆相页岩在岩相及储集层方面的差异较大，制约了油气勘探与开发进展。因此，以川东地区侏罗系自流井组东岳庙段页岩为研究对象，利用岩心观察、扫描电镜、低温氮气吸附等手段和技术，分析不同岩相的孔隙类型及特征，明确不同岩相的储集物性差异，以期为川东地区东岳庙段页岩油气勘探开发提供理论依据和技术支撑。

1 地质背景

四川盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地，现今盆地面积为 $1.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，仅为侏罗纪沉积盆地的三分之一（郭正吾等，1996；四川省地质志编纂委员会，1998）。现今盆地一级构造单元包括川西低陡构造带、川北低缓构造带、川北平缓构造带、川西南低褶皱构造带、川南低陡

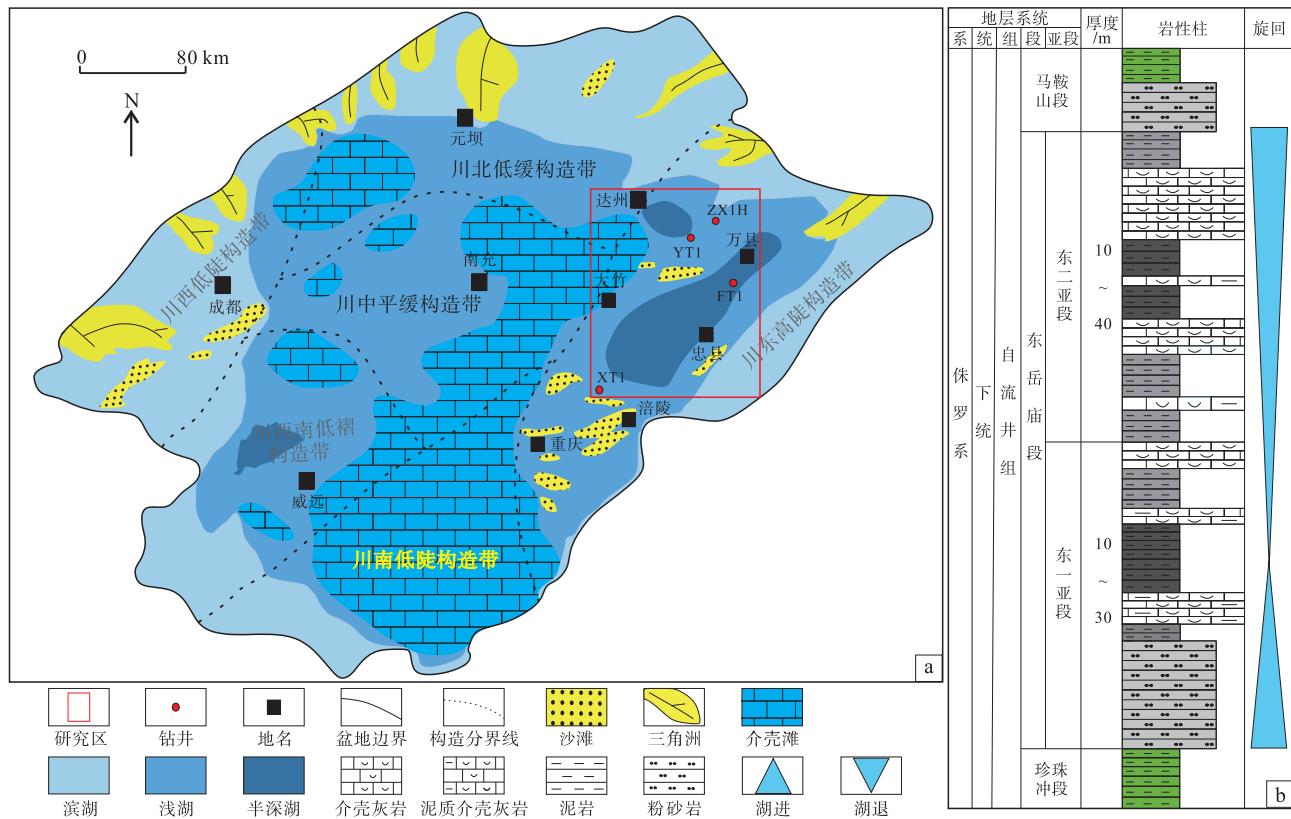
构造带和川东高陡构造带 6 个构造单元（刘树根等，2008）。川东地区隶属于川东高陡构造带（图 1-a），在印支、燕山和喜山运动的影响下，受到由南东向北西方向的推挤作用，从而发育一系列 NNE、NEE 向复背斜和复向斜组合的隔挡式褶皱，侏罗系主要出露在向斜处，整体保存较为完整（李英强和何登发，2014）。

四川盆地早—中侏罗世沉积了 4 套以滨浅湖—半深湖相为主的富有机质页岩地层，自下而上分别为：下侏罗统自流井组的珍珠冲段、东岳庙段、大安寨段和中侏罗统凉高山组，其沉积中心位于川东—川北，黑色页岩累计厚度 $100 \sim 400 \text{ m}$ （邹才能等，2019）。其中，东岳庙段为淡水湖泊沉积（何江林等，2022），整体由 1 套灰色—灰黑色页岩—含介壳页岩、灰色—深灰色介壳灰岩—含泥介壳灰岩、灰白色—浅灰色泥质粉砂岩—粉砂岩组成（王峻，2007），厚度介于 $20 \sim 70 \text{ m}$ 之间，与上覆、下伏地层均呈整合接触关系。根据测井和岩性等特征，东岳庙段自下而上可划分为东一和东二共 2 个亚段（图 1-b），东一亚段以泥岩—粉砂岩—介壳灰岩沉积组合为主，厚度介于 $10 \sim 30 \text{ m}$ 之间；东二亚段以泥岩—介壳灰岩沉积组合为主，砂质含量较低，厚度在 $10 \sim 40 \text{ m}$ 之间。

2 样品采集和测试

笔者采集了 YT1 井、ZX1H 井、FT1 井和 XT1 井共计 109 m 的岩心资料和 223 张普通薄片图像以及 584 张扫描电子显微镜（SEM）图像；YT1 井的 29 块岩心样品的孔渗物性数据、6 块样品氮气吸附实验数据；YT1 和 ZX1H 井共 59 个页岩样品 X 射线衍射（XRD）分析数据以及总有机碳（TOC）含量实验数据。

普通薄片观察在日本尼康公司生产的 DS-Ri1 显微镜下进行观察。电子显微观察是利用德国卡尔蔡司公司生产的 EVO MA15 型扫描电子显微镜（SEM）进行的。该仪器配备了 X 射线能谱仪（EDS），具备二次电子成像（SE）和背散射电子成像（BSE）功能，能够在纳米级别的尺度上对样品表面形态进行高分辨率观察。工作电压范围为 $0.2 \sim 30 \text{ kV}$ ，压力范围为 $10 \sim 400 \text{ Pa}$ ，放大倍数可达 $5 \sim 100$ 万倍。所选样品被切割成接近 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的立方体形状，经过最高至 2000 目砂纸的



a—四川盆地构造及东岳庙段沉积相平面图；b—侏罗系自流井组东岳庙段地层柱状图

图 1 四川盆地东岳庙段沉积相及地层柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies and stratigraphic histograms of the Dongyuemiao Member in Sichuan Basin

打磨和抛光，直至样品表面呈现镜面反射，随后经氩离子抛光处理，以去除因砂纸打磨而形成的表面层。这些样品在西南石油大学的多视域显微镜实验室及扫描电镜实验室中进行观察分析。

总有机碳（TOC）含量的测定是利用 CS230SH 型碳硫分析仪完成。实验在温度为 27℃、相对湿度为 55%RH 的环境下进行，检测过程遵循了国家标准 GB/T 29172-2012。全岩矿物分析是在 K40522 型 X 射线衍射仪（XRD）上测定，实验在温度 23℃ 和相对湿度 60%RH 的稳定环境中进行，遵循了行业标准 SY/T 5163-2010。孔隙度和渗透率的测定是利用 STL-II 型高压渗透率仪完成。实验在温度范围 15~20℃、相对湿度 46%RH~60%RH 的环境下进行，测试遵循国家标准 GB/T 29172-2012。样品均是由玛瑙研钵研磨成粉末状，然后通过 80 目的筛网筛选，收集 5~10 g 的粉末样品。这些样品送至中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院的分析实验中心进行检测。

氮气吸附测试是由 autosorb iQ 型化学吸附分析

仪完成的，浴温为 77.35 K，样品重量在 4~6 g，分析时间 500~1000 min，样品在检测前经过 12 h 的脱气处理，以保证孔隙空间在实验开始时是清洁的，使用了氮气作为吸附气体，以评估样本中孔径在 2~100 nm 之间孔隙的结构。数据处理是在 Quantachrome Instruments 的 ASiQwin 软件（版本 5.21）进行的。比表面积、孔体积和孔径分布通过 BET（Brunauer-Emmett-Teller）和 BJH（Barrett-Joyner-Halenda）方法计算得出。孔径分布图根据 BJH 模型，选用吸附支线作为数据源（由于脱附支线存在拐点 G 的影响），经处理得到。测试样品送至四川省科源工程技术测试中心进行测试。

3 岩相类型及特征

3.1 岩相类型划分

岩相划分方案主要参考了前人的页岩矿物组分三端元划分方法（郝运轻等，2012；刘忠宝等，2019；康家豪等，2022），并结合有机碳（TOC）

含量进行综合命名。根据划分方案，岩相类型共划分 4 大类 13 小类（表 1）。考虑到研究区 TOC 总体较低，平均值仅为 1.19%，故以 TOC < 0.5%、0.5%~1.0%、1.0%~2.0%、>2.0% 作为 TOC 的划分界限，并分别以“含碳”、“低碳”、“中碳”、“高碳”作为前缀命名。最终命名方式为“XX-YY 碳 ZZ 质/ZZ（WW）混合质页岩”，在碳前缀中，主要的碳级别写在最后面。根据上述分类方案进行投图，结果显示，川东地区东岳庙段页岩共发育 4 小类岩相（图 2），分别为：高一中碳黏土质页岩（I₂）、含一中碳混合质页岩（II₁）、中一低碳粉砂（黏土）质混合质页岩（II₂）、含一低碳泥质粉砂岩（III₂）岩相。

3.2 页岩岩相类型及特征

3.2.1 高一中碳黏土质页岩（I₂）

该岩相主要分布在东二亚段中上部。黏土矿物含量在 49.7%~56.6% 之间，平均值为 52.7%；石英+长石含量在 40.4%~48.0% 之间，平均值为 44.2%；碳酸盐矿物质含量在 0%~6.3% 之间，平均值为 2.2%；TOC 值在 0.5%~3.2% 之间，平均值为 1.5%，TOC 分级主要为中碳，其次为高碳。岩心呈深灰—灰黑色，具有泥质结构。页理缝发育，缝内常被方解石半充填至全充填（图 3-a）。粉砂颗粒分布均匀，分选良好，磨圆程度一般，粒径在 5~20 μm 之间。常见黄铁矿集合体。细脉状

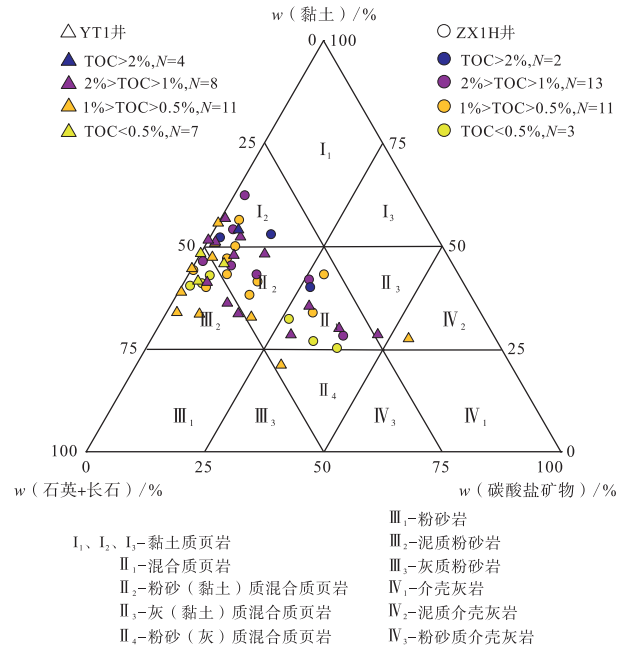


图 2 川东地区侏罗系东岳庙段页岩组分质量分数三元图（据王宏语等，2018；有修改）

Fig. 2 Ternary diagram of mass fraction of mineral components in shale from the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin (modified from Wang *et al.*, 2018)

和透镜状有机质掺杂在黏土矿物中，从而形成富有机质纹层与黏土纹层的组合，2 种纹层之间界限常不清晰（图 3-b）。

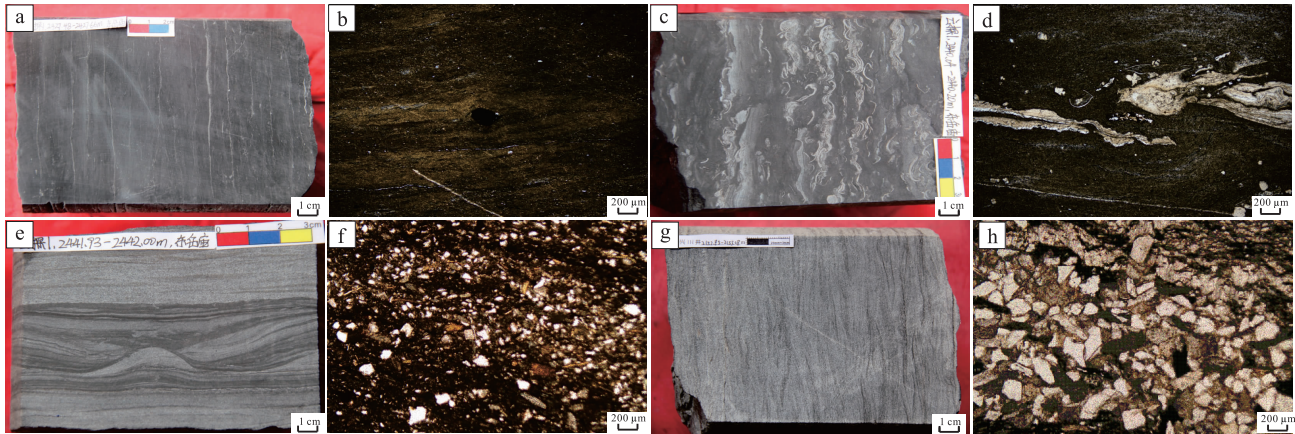
3.2.2 含一中碳混合质页岩（II₁）

该岩相主要分布在东一亚段的上部和东二亚段

表 1 川东地区侏罗系东岳庙段岩相类型划分方案（据刘忠宝等，2019；有修改）

Table 1 Petrographic type delineation scheme of the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin (modified from Liu *et al.*, 2019)

矿物组分/%			前缀	岩相类型	岩相区
黏土	石英+长石	碳酸盐			
	< 25	< 25		黏土质页岩 (I ₁)	I
> 50	25~50	< 25		黏土质页岩 (I ₂)	
	< 25	25~50		黏土质页岩 (I ₃)	
25~50	25~50	25~50		混合质页岩 (II ₁)	II
25~50	25~50	< 25		粉砂(黏土)质混合质页岩 (II ₂)	
25~50	< 25	25~50		灰(黏土)质混合质页岩 (II ₃)	
< 25	25~50	25~50	含碳、 低碳、 中碳、 高碳	粉砂(灰)质混合质页岩 (II ₄)	
< 25		< 25		粉砂岩 (III ₁)	III
25~50	> 50	< 25		泥质粉砂岩 (III ₂)	
< 25		25~50		灰质粉砂岩 (III ₃)	
< 25	< 25			介壳灰岩 (IV ₁)	IV
25~50	< 25	> 50		泥质介壳灰岩 (IV ₂)	
< 25	25~50			粉砂质介壳灰岩 (IV ₃)	



a—高一中碳黏土质页岩 (I₂), 井深 2427.48~2427.66 m; b—高一中碳黏土质页岩 (I₂), 井深 2443.12 m, ×50 (-); c—含一中碳混合质页岩 (II₁), 井深 2440.04~2440.20 m; d—含一中碳混合质页岩 (II₁), 井深 2427.28 m, ×50 (-); e—中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂), 井深 2441.93~2442.00 m; f—中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂), 井深 2443.57 m, ×50 (-); g—含—低碳泥质粉砂岩 (III₂), 井深 2152.85~2153.08 m; h—含—低碳泥质粉砂岩 (III₂), 井深 2443.57 m, ×50 (-)

图 3 川东地区 YT1 井侏罗系东岳庙段页岩岩相特征

Fig. 3 Petrographic characteristics of shale from the Jurassic Dongyuemiao Member of Well YT1 in eastern Sichuan Basin

的下部。黏土矿物含量在 27.8%~34.4% 之间, 平均值为 30.5%; 石英+长石含量在 31.0%~41.6% 之间, 平均值为 35.6%; 碳酸盐矿物含量在 28.2%~37.4% 之间, 平均值为 31.4%; TOC 值在 0.3%~2.1% 之间, 平均值为 0.9%, TOC 分级主要为中碳, 其次为含碳。岩心呈深灰—浅灰—灰白色。生物扰动明显, 常见逃逸孔、潜穴和水平钻孔。富含双壳类生物化石, 壳厚且个体完整, 常沿层理排列(图 3-c)。介壳边缘方解石矿物的重结晶现象显著。粉砂颗粒与黏土矿物分异较明显, 形成粉砂纹层与黏土纹层的组合(图 3-d)。这些纹层呈现弯曲变形, 纵向连续性差, 有机质呈星点状和水平拉长状分布其中。

3.2.3 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂)

该岩相主要分布在东二亚段, 单层厚度较薄, 一般在 3~10 cm 之间。黏土矿物含量在 32.1%~47.5% 之间, 平均值为 42.7%; 石英+长石含量在 33.9%~48.6% 之间, 平均值为 44.5%; 碳酸盐矿物含量在 2.9%~18.1% 之间, 平均值为 9.2%; TOC 值在 0.5%~2.0% 之间, 平均值为 1.1%, TOC 分级主要为低碳, 其次为中碳。岩心呈灰黑—浅灰色, 灰黑色黏土纹层和浅灰色粉砂纹层可呈波状、平行状组合(图 3-f), 并含少量介壳生物。粉砂颗粒多呈次棱角状至次圆状, 粉砂颗粒 (粒径 25~85 μm) 之间以点接触为主(图 3-f)。

3.2.4 含—低碳泥质粉砂岩 (III₂)

该岩相主要分布在东—亚段中下部。黏土矿物含量在 33.1%~47.2% 之间, 平均值为 38.5%; 石英+长石含量在 50.6%~63.5% 之间, 平均值为 55.3%; 碳酸盐矿物含量在 0%~15.1% 之间, 平均值为 4.9%; TOC 值在 0.2%~1.7% 之间, 平均值为 0.8%, TOC 分级主要为低碳, 其次为含碳。岩心呈浅灰—灰白色, 具有粒屑结构。常见的沉积构造包括脉状层理、块状层理, 少见交错层理。此外, 还可见到零散分布的毫米级黑色碳化植物碎片(图 3-g)。黏土矿物作为“杂基”填充于粉砂颗粒之间。粉砂颗粒之间主要为点接触和线接触, 少量为缝合线接触。颗粒的分选性和磨圆性差, 多呈棱角状。颗粒粒径 50~150 μm (图 3-h)。

4 储集层特征

4.1 不同岩相储集层特征

研究区页岩整体具有低孔、低渗的特征。根据孔隙度、渗透率数据, 基于不同岩相类型进行分析(图 4), 结果表明东岳庙段页岩孔隙度值在 0.40%~2.46% 之间, 平均值为 1.30%; 渗透率在 $(0.0003 \sim 0.8230) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $0.1273 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中, 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂) 和高—中碳黏土质页岩 (I₂)

孔隙度和渗透率都较高,表明其储集层物性较好;含一中碳混合质页岩(II₁)孔隙度和渗透率都较低,表明其储集层物性较差;含一低碳泥质粉砂岩(III₂)孔隙度较低而渗透率较高(图4-a,4-b)。其中这4类岩相的孔渗相关性都较好,呈现明显的正相关(图4-c)。

4.2 储集空间类型

东岳庙段页岩储集空间主要包括微孔隙和微裂缝2类。微孔隙可分为无机孔和有机质孔,其中无机孔包括黏土矿物晶间孔、黄铁矿晶间孔、粒间孔及溶蚀孔等。微裂缝包括页理缝、介壳边缘缝、有机质收缩缝、构造缝和溶蚀缝等。不同岩相储集空间类型的发育情况可见表2。

4.2.1 微孔隙

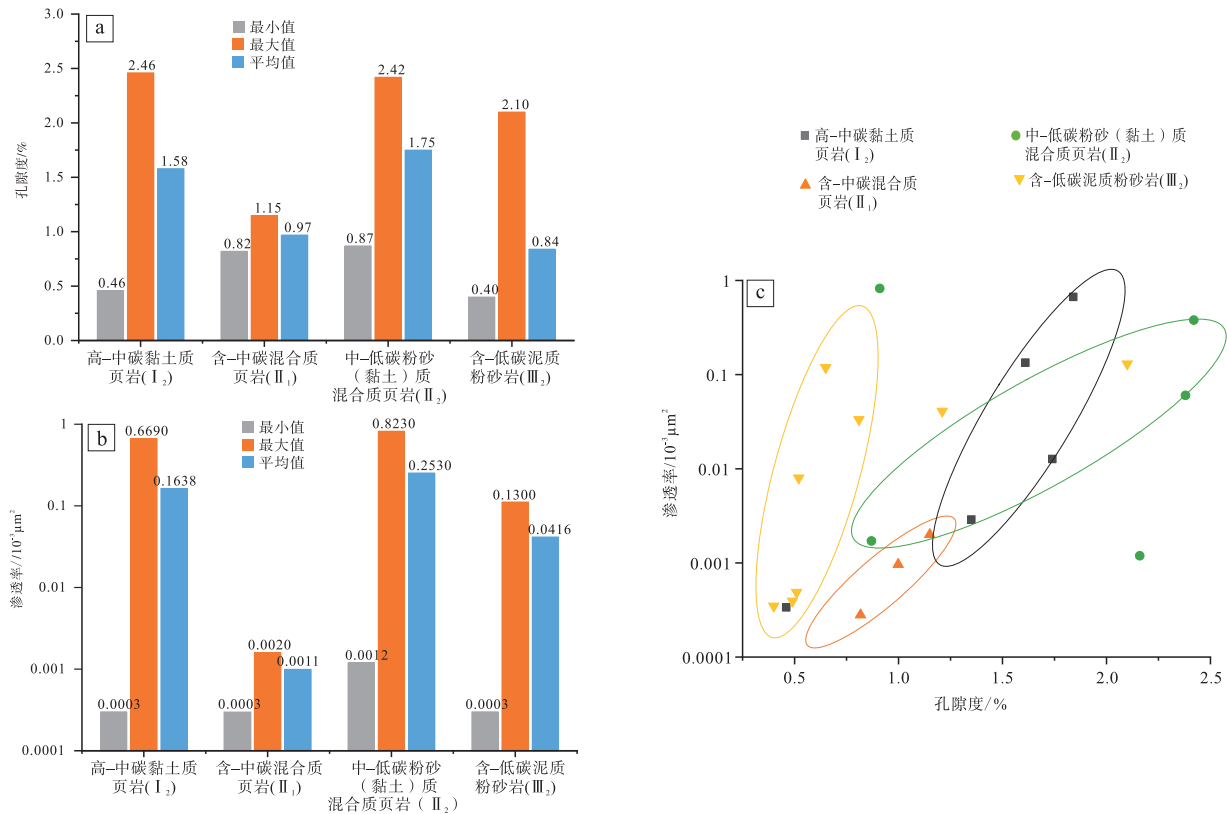
1) 晶间孔。晶间孔主要包括黏土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔。黏土矿物晶间孔在伊利石和伊一蒙混层中较为常见,呈狭长线状、条状或三角状(图5-a,5-b),是研究区页岩主要的储集空间类型;黄铁矿集合体有球状、透镜状2种典型形态

(图5-c,5-d),其中的孔隙发育类别和程度不同,但都不是主要的储集空间类型。

2) 粒间孔。粒间孔主要发育在石英、长石或方解石等脆性颗粒之间或脆性颗粒和黏土矿物之间的孔隙。脆性颗粒之间形成的粒间孔通常呈三角状(图5-e),孔径较大。相较而言,脆性颗粒与黏土矿物之间形成的粒间孔较小,通常呈狭长线状或带状(图5-f)。通过电镜观察,粒间孔整体都较少发育,不是主要的储集空间类型。

3) 溶蚀孔隙。长石溶蚀孔通常呈三角状或圆状(图5-g),常被黏土矿物或有机质充填(图5-h);而方解石介壳内的溶蚀孔常呈串珠状分布,较少被充填(图5-i)。整体来说,溶蚀孔的发育情况变化大,多在有机质丰度高、碳酸盐含量适中的页岩样品中发育介壳溶蚀孔。

4) 有机质孔。研究区页岩的有机质孔发育程度关键受有机质显微组分类型及有机质含量的控制(周圆圆等,2023)。对于不同的有机质显微组分,腐泥组有机质相较于腐殖组有机质更易发育有机质孔(杨超,2017;谷渊涛等,2021)。



a—各岩相孔隙度分布柱状图; b—各岩相渗透率分布柱状图; c—各岩相孔隙度—渗透率相关散点图

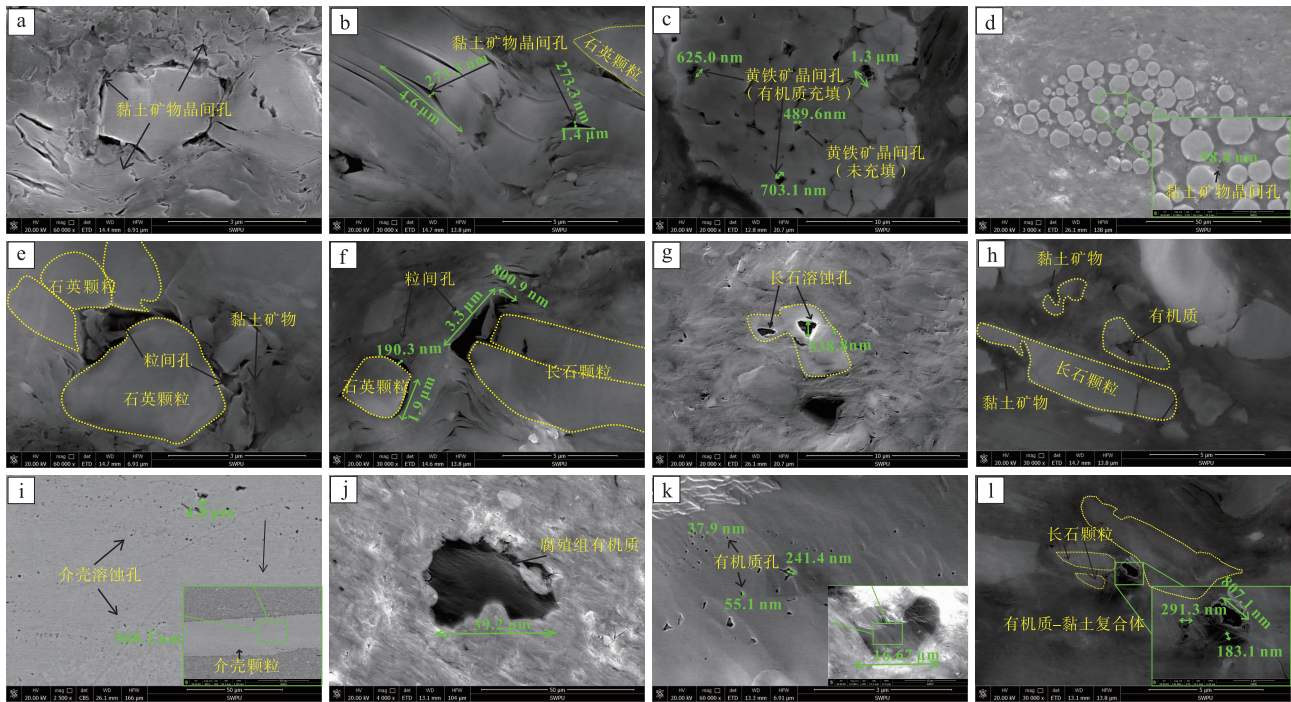
图4 川东地区侏罗系东岳庙段页岩各岩相储集层特征

Fig. 4 Reservoir characteristics of various lithofacies of shale in the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

表 2 川东地区侏罗系东岳庙段页岩储集空间类型及各岩相储集空间发育情况
Table 2 Types of shale reservoir space and development of reservoir space of the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

孔隙类型	储集空间类型	亚类	形态	尺寸		成因	各岩相孔隙、裂缝类型发育情况										
				孔径/ μm	缝长		高—中碳黏土 质页岩(I ₂)	含—中碳混合 质页岩(II ₁)	中—低碳粉砂(黏土) 质混合质页岩(II ₂)	含—低碳泥质 粉砂岩(III ₂)							
晶间孔	黏土矿物晶间孔	狭长线状、条状、三角状	0.015~6.144, 平均值 0.420	与黏土矿物转变有关	★★★	★★	★★★	★★	★★★	★							
											黄铁矿晶间孔	多边形	0.067~1.368, 平均值 0.356	与黄铁矿集合体有关	★	★	★
粒间孔	颗粒—颗粒间孔	狭长线状、带状	0.205~1.881, 平均值 0.836	与原生沉积有关	★	★	★	★	★	★★							
											颗粒—黏土矿物粒间孔	0.074~0.331, 平均值 0.146	★	★★	★	★★	
溶蚀孔隙	介壳溶蚀孔	圆状	0.036~3.747, 平均值 0.585	溶蚀作用	★	★	★	★	★★	★							
											长石溶蚀孔	三角状	孔隙多数被充填	∖	∖	∖	
有机质孔	腐殖组有机质孔	圆状	致密, 极少发育孔隙	∖	∖	∖	∖	∖	∖	∖							
											腐泥组有机质孔	孤立圆状	0.010~0.264, 平均值 0.106	有机质热演化	★★	★	★
											固体沥青及有机质—黏土复合有机质孔	蜂窝状	0.009~0.822, 平均值 0.347	★★★	★★	★★	★★
页理缝	水平波浪状	0.211~1.235, 平均值 0.656	微米级到分米级	成岩作用、异常高压作用、卸荷作用	★★★	★★	★★★	★★	★★★	★							
											介壳边缘缝	与介壳形态有关、线状	0.106~1.668, 平均值 0.560	厘米级	成岩作用、异常高压作用、卸荷作用	★	★★★
微构造缝	黏土矿物构造缝	高角度锯齿状	0.017~0.131, 平均值 0.051	微米级	有机质热演化	★★	★★	★★	★	★							
											脆性矿物构造缝	“人”字型、“之”字型	1.384~3.460, 平均值 2.422	毫米级	构造作用、异常压力作用	★	★★
溶蚀缝	溶蚀扩大缝	宽线状	0.545~6.769, 平均值 2.330	微米级	溶蚀作用	★	★	★	★	★							
											边缘溶蚀缝	与颗粒形态有关、窄线状	0.159~0.399, 平均值 0.258	微米级	★	★	★

注：★★★代表发育程度高，★★代表发育程度较高，★代表发育程度一般，∖代表发育程度低。发育程度仅能在同一岩相中比较。标红代表同一岩相中主要的储集空间类型



a—黏土矿物晶间孔, FT1 井, 井深 1842.55 m; b—黏土矿物晶间孔, ZX1H 井, 井深 2132.40 m; c—球状黄铁矿集合体, 黄铁矿晶体间未被充填或被有机质充填, ZX1H 井, 井深 2134.05 m; d—透镜状黄铁矿集合体, 黄铁矿晶体间被黏土矿物充填, ZX1H 井, 井深 2145.68 m; e—粒间孔, ZX1H 井, 井深 2132.40 m; f—粒间孔, ZX1H 井, 井深 2132.40 m; g—长石溶蚀孔, ZX1H 井, 井深 2144.00 m; h—长石溶蚀, 被黏土矿物或有机质充填, ZX1H 井, 井深 2132.40 m; i—介壳溶蚀孔, ZX1H 井, 井深 2145.68 m; j—腐殖组有机质, XT1 井, 井深 1942.24 m; k—腐泥组有机质, 发育孤立状有机质孔, ZX1H 井, 井深 2142.17 m; l—有机质—黏土复合体, 发育蜂窝状有机质孔, ZX1H 井, 井深 2142.17 m

图 5 川东地区侏罗系东岳庙段页岩微孔隙类型及特征

Fig. 5 Microporosity types and characteristics of shale in the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

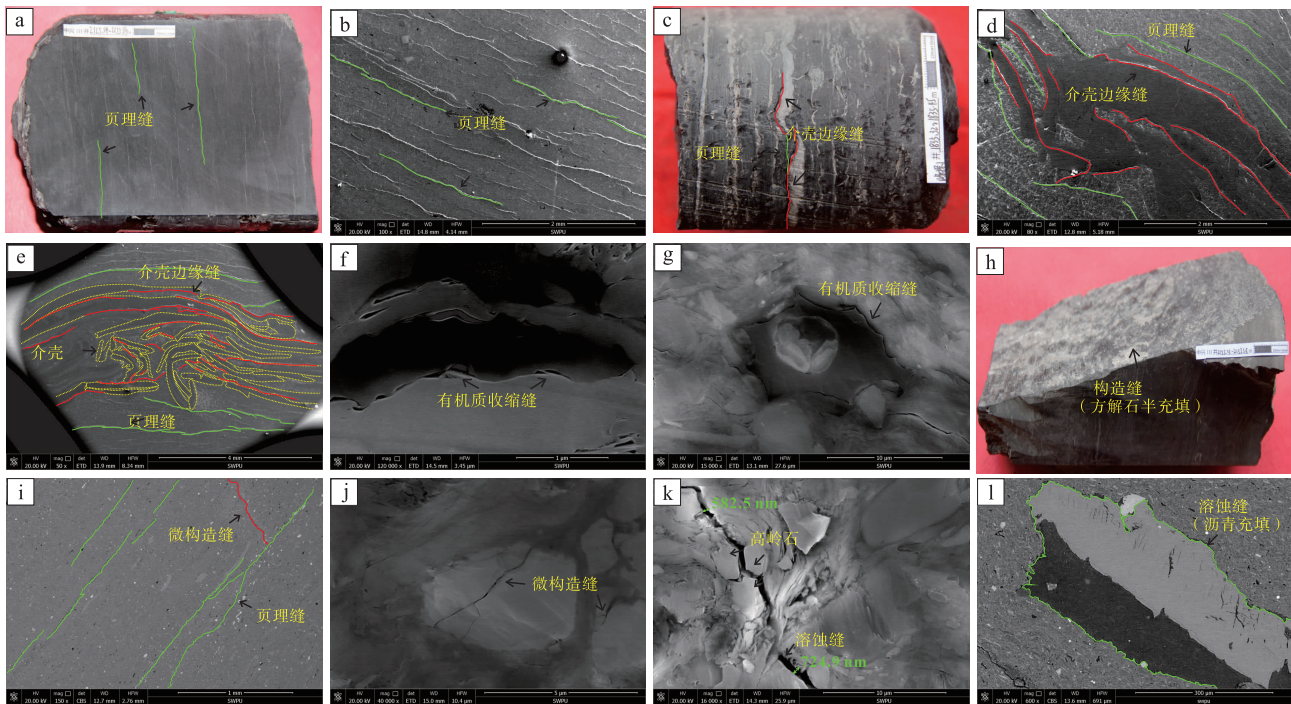
在电镜下观察发现, 页岩中腐殖组有机质具有较大的个体尺寸(直径在 20~50 μm 之间)和整体致密的特点, 不发育有机质孔(图 5-k); 腐泥组有机质个体小(直径<20 μm), 发育少量孤立状有机质孔。而充填在黄铁矿晶间孔和粒间孔的固体沥青(图 5-c)以及页岩中普遍存在有机质—黏土复合体(李晓霞等, 2023), 多发育蜂窝状有机质孔(图 5-l)。总之, 有机质孔是研究区页岩仅次于黏土矿物晶间孔的主要储集空间类型之一。

4.2.2 微裂缝

微裂缝是由沉积作用、成岩作用、构造作用以及异常高压作用等单因素或多种因素共同作用产生的(李长海等, 2020)。开启的微裂缝不仅可作为油气的储集空间, 还能作为油气的运移通道。而闭合的微裂缝在压裂改造后可能重新开启(琚宜文等, 2014), 并与人工裂缝相互沟通, 形成裂缝网络, 从而成为油气运移的通道。

1) 页理缝。页岩在沉积过程中形成的页理面天然具有力学薄弱特性。在成岩作用、异常高压作用以及卸荷作用的影响下, 页理面容易开裂, 形成页理缝。在研究区页理缝在宏观(岩心)和微观(电镜)层面均可观察到(图 6-a, 6-b)。页理缝常成组出现, 呈波浪状沿水平方向展布。缝内通常被方解石半充填至全充填。页理缝是页岩中最为典型和常见的微裂缝类型之一。但通常认为, 埋藏条件下的页理缝处于闭合状态(郭旭升等, 2016), 经过压裂改造后可重新开启(冀昆, 2014)。

2) 介壳边缘缝。介壳颗粒与黏土矿物的接触面同样具有力学薄弱特性, 在接触面附近容易形成沿着介壳边缘开裂的介壳边缘缝。这类裂缝在宏观和微观层面均可观察到, 常与页理缝共同出现。根据介壳边缘缝在延伸方向上的发育情况, 可分为 2 类: 第 1 类是当介壳的长轴与页理缝走向接近平行或小角度相交时(图 6-c, 6-d), 介壳边缘缝发



a—页理缝, ZX1H 井, 井深 2125.14~2125.34 m; b—页理缝, XT1 井, 井深 1964.79 m; c—介壳边缘缝, 与页理缝相互转化, FT1 井, 井深 1835.32~1835.45 m; d—介壳边缘缝, FT1 井, 井深 1844.90 m; e—介壳边缘缝, XT1 井, 井深 1961.20 m; f—有机质收缩缝, 腐殖组有机质, FT1 井, 井深 1842.55 m, $\times 50 (-)$; g—有机质收缩缝, 腐殖组有机质, ZX1H 井, 井深 2142.17 m; h—高角度构造缝, ZX1H 井, 井深 2153.33~2153.58 m; i—微构造缝, 与页理缝高角度斜交, ZX1H 井, 井深 2134.05 m; j—微构造缝, ZX1H 井, 井深 2133.16 m; k—溶蚀缝, 溶蚀缝边缘见自生高岭石, ZX1H 井, 井深 2126.56 m; l—溶蚀缝, 边缘被沥青充填, FT1 井, 井深 1844.90 m

图 6 川东地区侏罗系东岳庙段页岩微裂缝类型及特征

Fig. 6 Microfracture types and characteristics of shale in the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

育, 延伸长度可达毫米级至分米级, 介壳边缘缝与页理缝相互转换; 第 2 类是当介壳的长轴与页理缝走向接近垂直或大角度相交时, 介壳边缘缝不发育, 延伸长度仅为毫米级(图 6-e)。

介壳边缘缝与页理缝的性质相似, 虽然它们不能作为主要的储集空间, 但在压裂改造后表现出较好的效果, 从而与人工裂缝共同组成裂缝网络, 具有良好的油气沟通能力。

3) 有机质收缩缝。有机质收缩缝的发育与有机质类型密切相关(杨超, 2017), 腐殖组有机质由于塑性较差, 不易形成有机质孔, 而常发育有机质收缩缝; 腐泥组有机质塑性较好, 易形成有机孔, 而有机质收缩缝不发育。东岳庙段页岩中此 2 类有机质含量近似持平。有机质收缩缝通常出现在有机质与黏土矿物之间, 呈宽窄不一的线状或断续波状(图 6-f, 6-g), 缝宽较小。有机质收缩缝的油气沟通能力差, 但它们是良好的油气储集空间。

4) 构造缝。构造缝是在构造作用或异常压力

作用下沿着一定方向形成的无明显位移的断裂。这类裂缝在宏观和微观尺度上均可观察到。在宏观尺度下构造缝较常见, 主要表现为高角度斜交裂缝(图 6-h), 边缘较为平直, 被方解石半充填至全充填。在微观尺度下, 构造缝在黏土矿物中较为少见(图 6-i); 在脆性矿物中, 构造缝相对常见, 多呈“人”字型切割矿物(图 6-j), 边缘较为平直, 可见少量黏土矿物。通过电镜观察认为, 研究区页岩中微构造缝并不发育。

5) 溶蚀缝。溶蚀缝通常是在已有裂缝基础上经过溶蚀扩大形成, 或是在长石、方解石等矿物边缘发生溶蚀而形成的裂缝(王同等, 2016; 汪虎等, 2019)。前者缝宽大, 两侧常伴有高岭石的形成(图 6-k)。后者通常被沥青全充填(图 6-l)。在研究区页岩中, 溶蚀缝偶尔可见, 不是主要的储集空间类型。

4.3 孔隙结构特征

根据国际理论与应用化学联合会(简称为 IU-

PAC) 提出的孔隙分类方案, 将孔隙分为微孔 (<2 nm)、介孔 (2~50 nm) 和宏孔 (>50 nm) 三大类。前人对陆相页岩微观孔隙全直径的研究揭示页岩的微孔隙主要为介孔, 其次为宏孔或微孔 (杨峰等, 2013; 杨锐, 2018; 孙越等, 2023)。鉴于低压氮气吸附实验已可用于表征孔径范围在 2~100 nm 之间的孔隙特征 (朱庆山等, 2008), 本研究拟通过低压氮气吸附实验来研究不同岩相的孔隙特征及差异。

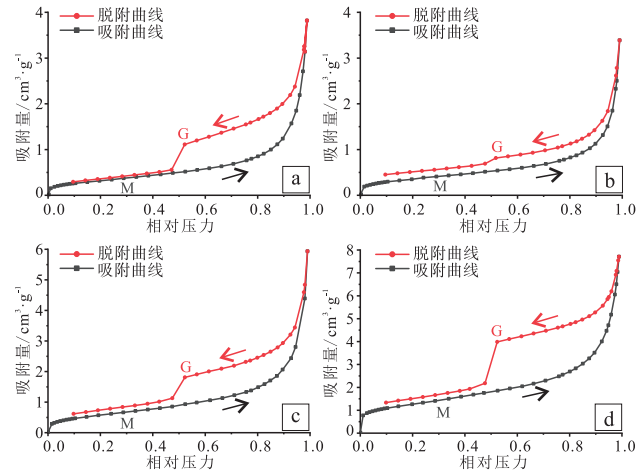
4.3.1 氮气吸附—脱附等温线

不同的等温线类型可以定性判别样品中孔隙的大小和形态 (韩云, 2018), IUPAC 将吸附等温线划分为 6 种类型, 分别为 I 型—VI 型 (Sing, 1985; 陈尚斌等, 2012)。当吸附支线与脱附支线不重合时, 将出现脱附支线滞后现象, 形成回滞环 (杨超等, 2014), 根据回滞环类型, IUPAC 进一步将等温线分为 H1、H2、H3、H4 类 (De Boer, 1958; Sing, 1985; 罗超等, 2014)。实际样品的等温线类型常常是以上几类典型等温线叠加构成的 (徐浩, 2019)。

从氮气吸附—脱附曲线图 (图 7) 的分析中可得出, 不同岩相页岩样品的吸附—脱附曲线基本相同, 都为 II 型和 IV 型的叠加, 回滞环为 H2 型和 H3 型叠加。前人研究认为 II 型等温线指示宏孔为主, 微孔、介孔存在, IV 型等温线指示介孔为主 (何云鹏和杨水金, 2018); H2 型回滞环指示存在“墨水瓶”状孔, H3 型回滞环指示存在开放性片状狭缝孔 (魏祥峰等, 2013)。结合前人关于研究区东岳庙段页岩孔隙的全直径研究 (李旭等, 2019; 孙越等, 2023; 舒志国等, 2024), 研究区东岳庙段页岩的 4 类岩相中介孔和宏孔皆存在, 并且都存在“墨水瓶”状孔和开放性片状狭缝孔。但高一中碳黏土质泥页岩 (I₂)、含一中碳混合质泥页岩 (II₁)、中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质泥页岩 (II₂) 中介孔占主要地位; 含一低碳泥质粉砂岩 (III₂) 的介孔、宏孔二者占比相近, 且根据拐点 (G 点) 的下降幅度, 认为其“墨水瓶”状孔更为发育。

4.3.2 孔径分布

从孔径分布图 (图 8) 可以看出, 在 2~100 nm 孔径范围内, 不同页岩岩相的孔体积变化率曲线近似, 都表现为随孔径增加孔体积变化率逐渐下降,



a—YT1 井, 井深 2433.40 m, 高一中碳黏土质页岩 (I₂); b—YT1 井, 井深 2443.57 m, 含一中碳混合质页岩 (II₁); c—YT1 井, 井深 2429.81 m, 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂); d—YT1 井, 井深 2447.48 m, 含一低碳泥质粉砂岩 (III₂)

图 7 川东地区侏罗系东岳庙段页岩各岩相氮气吸附—脱附曲线

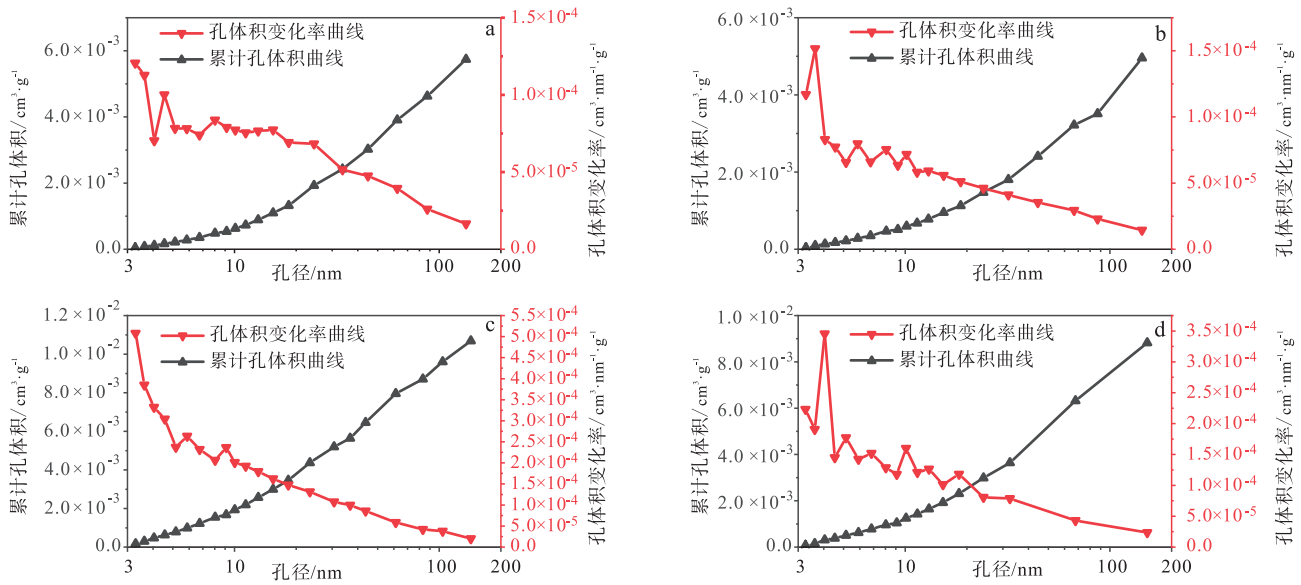
Fig. 7 Nitrogen adsorption-desorption curves of shale in the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

孔径在 3~10 nm 范围内, 孔体积变化率曲线出现多个峰值。说明在 2~100 nm 孔径范围内, 页岩中多数孔的孔径在 60 nm 以下, 尤其集中在孔径 3~10 nm 范围内。在累计孔体积方面, 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质泥页岩 (II₂) 和含一低碳泥质粉砂岩 (III₂) 的累计孔体积较高, 说明这两者的孔隙空间较大, 但含一低碳泥质粉砂岩 (III₂) 的孔多为“墨水瓶”状孔, 对应于粒间孔的形态, 其连通性差。

4.3.3 比表面积、孔体积和平均孔径

在研究区中, 东岳庙段页岩样品的 BET 比表面积在 1.204 ~ 4.530 m²/g 之间, 平均值为 2.301 m²/g; BJH 孔体积范围在 0.005 ~ 0.011 cm³/g 之间, 平均值为 0.008 cm³/g; BJH 孔径范围在 3.271 ~ 4.044 nm 之间, 平均值为 3.560 nm。从表 3 的数据可以看出, III₂ 型具有最高的比表面积和孔体积值, II₂ 型次之, 而 I₂ 型和 II₁ 型最低。

由于不同孔径大小对比表面积和孔体积的贡献能力不同 (付小平等, 2021), 受测试方法单一的局限性, 为使其孔隙参数具有可比性, 只能在以介孔为主的岩相中比较孔隙参数, 在 I₂ 型、II₁ 型



a—YT1 井, 井深 2433.40 m, 高一中碳黏土质页岩 (I₂); b—YT1 井, 井深 2443.57 m, 含一中碳混合质页岩 (II₁); c—YT1 井, 井深 2429.81 m, 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂); d—YT1 井, 井深 2447.48 m, 含—低碳泥质粉砂岩 (III₂)

图 8 川东地区侏罗系东岳庙段页岩各岩相孔径分布

Fig. 8 Pore size distributions of shale of the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

表 3 川东地区侏罗系东岳庙段页岩各岩相氮气吸附法孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of shale of the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin by nitrogen adsorption method in various lithofacies

井号	层位	深度/m	岩相	BET 比表面积/m ² ·g ⁻¹	BJH 孔体积/cm ³ ·g ⁻¹	BJH 平均孔径/nm
YT1	东岳庙段	2433.40	高一中黏土质页岩 (I ₂)	1.204	0.006	3.271
		2443.57	含一中碳混合质页岩 (II ₁)	1.302	0.005	3.635
		2429.81	中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II ₂)	2.168	0.009	4.044
		2447.48	含—低碳泥质粉砂岩 (III ₂)	4.530	0.011	3.290

和 II₂ 型这 3 类岩相中, 中—低碳粉砂 (黏土) 质混合质页岩 (II₂ 型) 具有最大的比表面积和孔体积, 这表明其容纳和吸附烃类气体的能力最强。

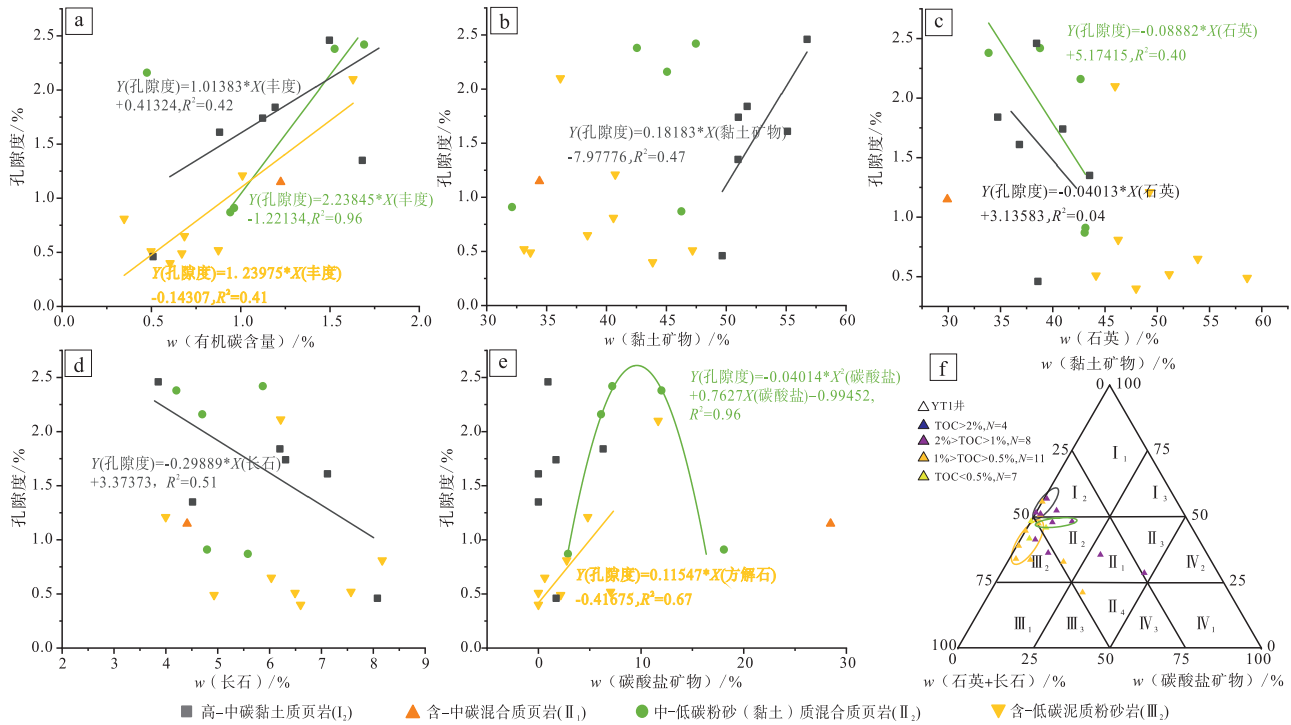
5 物性影响因素

选取无机组分含量 (黏土矿物、碳酸盐矿物、石英和长石矿物含量) 与有机组分含量 (有机碳含量) 作为定量指标, 通过相关性分析不同岩相的组分含量与孔隙度的关系。分析结果表明, 高有机质丰度 (>1%)、高黏土矿物含量 (>40%) 和适量的方解石矿物含量 (8%~12%) 有利于研究区页岩孔隙的发育, 而高石英+长石矿物含量 (>50%) 和过高或过低的碳酸盐矿物含量 (>12% 或 <8%) 则不利于页岩孔隙的发育。

1) 有机碳含量。除 II₁ 型岩相因为取样点极

少外, 在其余 3 类岩相中, 有机碳含量与孔隙度均呈现显著正相关性 (图 9-a)。有机质提供的孔隙来源于 2 个方面: 一方面是有机质演化过程中产生的有机酸, 溶蚀长石、方解石等易溶矿物, 从而形成溶蚀孔隙 (薛莲花等, 2015; 马妍, 2018); 另一方面, 在有机质演化过程中, 烃类的生成伴随其体积缩小, 从而产生有机质孔和有机质收缩缝 (张平, 2023)。当有机质丰度增加时, 单位体积中的黏土矿物、碳酸盐矿物等无机矿物含量减少, 显著正相关指示增加的有机质孔+溶蚀孔的储集空间远大于其他孔隙所减少的储集空间, 说明了有机质孔+溶蚀孔的孔隙度高。

2) 黏土矿物含量。在 I₂ 型岩相中, 黏土矿物含量与孔隙度呈现显著正相关性 (图 9-b)。在成岩过程中, 随着压实作用的加强, 黏土矿物开始



a—有机质丰度与孔隙度的相关关系；b—黏土矿物含量与孔隙度的相关关系；c—石英含量与孔隙度的相关关系；d—长石含量与孔隙度的相关关系；e—碳酸盐矿物含量与孔隙度的相关关系；f—页岩组分质量分数三元图及分布趋势

图 9 川东地区侏罗系东岳庙段页岩各组分与孔隙度相关关系

Fig. 9 Relationships between components of shale and porosity of mud shale from the Jurassic Dongyuemiao Member in eastern Sichuan Basin

脱水和转化，伊蒙混层和伊利石的含量逐渐增加，这些片状、层状和纤维状的黏土矿物能提供大量的黏土矿物晶间孔，是页岩中主要的孔隙类型（李成成等，2017；姜涛等，2021）。结合 I₂ 型岩相的各组分的变化趋势(图 9-f)：其有机质丰度保持高一中碳水平，随黏土矿物含量增加，方解石含量几乎不变，石英与长石含量减少。显著正相关指示增加的黏土矿物晶间孔的储集空间大于减少的粒间孔+长石溶蚀孔的储集空间，说明黏土矿物晶间孔的孔隙度较高。

3) 石英和长石含量。在 I₂ 型和 II₂ 型中，石英和长石这 2 类矿物含量都与孔隙度呈负相关性(图 9-c, 9-d)。石英和长石这类脆性矿物主要提供粒间孔和溶蚀孔（王晓梅等，2017；张顺，2018；姜涛等，2021），如前文所述，粒间孔整体不发育，且长石溶蚀孔常被黏土矿物和有机质充填。结合 I₂ 型和 II₂ 型各组分随石英和长石含量的变化趋势(图 9-f) 表明，粒间孔+长石溶蚀孔的孔隙度较低。虽然较高含量的石英和长石矿物不利

于孔隙的发育，但它们有利于压裂时产生网状裂缝（李可等，2016），将各类孔隙相互连通起来。

4) 碳酸盐含量。在前人研究中，页岩中碳酸盐矿物含量与孔隙度常表现为弱负相关或无相关性（张晓明等，2015；李旭等，2019）。但通过(图 9-e) 可以看出，碳酸盐矿物含量在较低范围时(<10%左右)，随着碳酸盐矿物含量的增加，孔隙度增加；在较高范围时(>10%左右)，随着碳酸盐矿物含量的增加，孔隙度开始减少。结合 III₂ 型各组分含量变化的趋势表明(图 9-f)，在碳酸盐矿物含量较低时，溶蚀作用较强，介壳溶蚀孔的孔隙度高于粒间孔+长石溶蚀孔；而当碳酸盐矿物含量较高时，溶蚀能力有限，此时介壳溶蚀孔的孔隙度低于粒间孔+长石溶蚀孔。

6 优势储集岩相及分布

针对东岳庙段页岩发育的 4 类岩相类型，采用显微电镜、全岩 X 射线、岩石热解、柱塞测试和低压氮气吸附实验等技术手段分析，对比了不同岩

相类型的页岩矿物含量、有机质丰度、物性等参数, 研究表明, 中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)是最优的储集岩相, 高一中碳黏土质页岩(I₂)次之, 含一中碳混合质页岩(Ⅱ₁)再次之, 含一低碳泥质粉砂岩(Ⅲ₂)最差。

中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)黏土矿物晶间孔、页理缝发育, 介壳溶蚀孔、有机质孔及介壳边缘缝较发育; 脆性指数平均为43.0%。压裂效果显著; 孔隙以介孔为主, 平均孔隙度为1.75%, 属于最优的储集岩相(图10-c)。

高一中碳黏土质页岩(I₂)相较于前者, 其黏土矿物含量和有机质丰度更高, 黏土矿物晶间孔、页理缝、有机质孔和有机质收缩缝都更发育; 但介壳溶蚀孔、介壳边缘缝不发育。脆性指数平均为40.9%, 压裂效果较好; 孔隙以介孔为主, 平均孔隙度为1.58%。属于较优的储集岩相(图10-a)。

而对于含一中碳混合质页岩(Ⅱ₁), 其黏土矿物含量低、碳酸盐含量高, 黏土矿物晶间孔不发育, 且多数介壳并不发育溶蚀孔, 属于较差的储集岩相(图10-b)。对于含一低碳泥质粉砂岩(Ⅲ₂), 其多数类型的孔、缝更不发育, 仅粒间孔和脆性矿物构造缝较发育, 是最差的储集岩相(图10-d)。

在岩相纵向分布上(图11), 中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)主要分布在东二亚段, 但分布不稳定, 通常紧邻高一中碳黏土质页岩(I₂)分布; 而高一中碳黏土质页岩(I₂)在东二亚段中上部分布广泛且单层厚度较大。在东二亚段中上部, 有机质丰度平均为1.49%, 孔隙度平均为1.88%, 渗透率平均为 $0.1495 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该层位

烃源、储集层及工程条件皆表现优越。结合实际情况, 认为高一中碳黏土质页岩(I₂)夹中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)岩相组合发育的东二亚段中上部是川东地区东岳庙段储集层优选层位。

7 结论

1) 川东地区东岳庙段陆相页岩矿物成分以黏土矿物和石英为主, 方解石次之, 并含少量长石、白云石、黄铁矿和菱铁矿。根据岩相划分方案, 页岩共划分出13类岩相。川东地区侏罗系东岳庙段页岩发育高一中碳黏土质页岩(I₂)、含一中碳混合质页岩(Ⅱ₁)、中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)和含一低碳泥质粉砂岩(Ⅲ₂)4类岩相。

2) 川东地区侏罗系东岳庙段页岩储集空间主要为微孔隙和微裂缝。前者主要为黏土矿物晶间孔, 次为有机质孔, 以及局部岩相中发育介壳溶蚀孔; 后者主要为页理缝和介壳边缘缝。

3) 通过对有机质丰度、黏土矿物、碳酸盐矿物、石英和长石矿物含量等5个可定量组分与孔隙度的相关性分析认为: 高有机质丰度(>1%)、高黏土矿物含量(>40%)和适量的碳酸盐矿物含量(8%~12%)有利于页岩孔隙的发育。而高石英+长石矿物含量(>50%)和过高或过低的碳酸盐矿物含量(>12%或<8%)则不利于页岩孔隙的发育。

4) 基于不同页岩岩相的矿物含量、有机质丰度、物性等参数的对比分析, 结果表明: 中—低碳粉砂(黏土)质混合质页岩(Ⅱ₂)是最有利的储集岩相, 高一中碳黏土质页岩(I₂)次之, 含一中

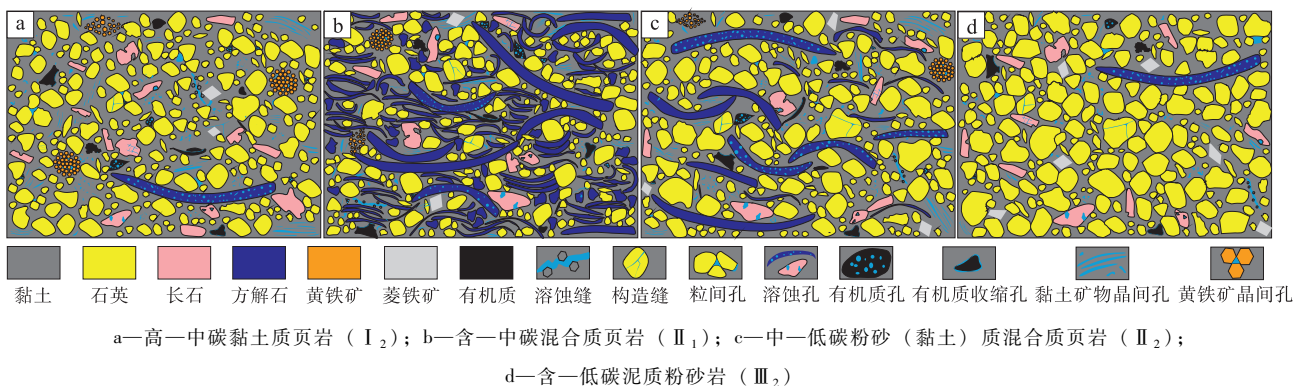


图10 川东地区侏罗系东岳庙段各岩相孔隙模式

Fig. 10 Pore patterns of each lithofacies in the Jurassic Dongyuemiao Member of eastern Sichuan Basin

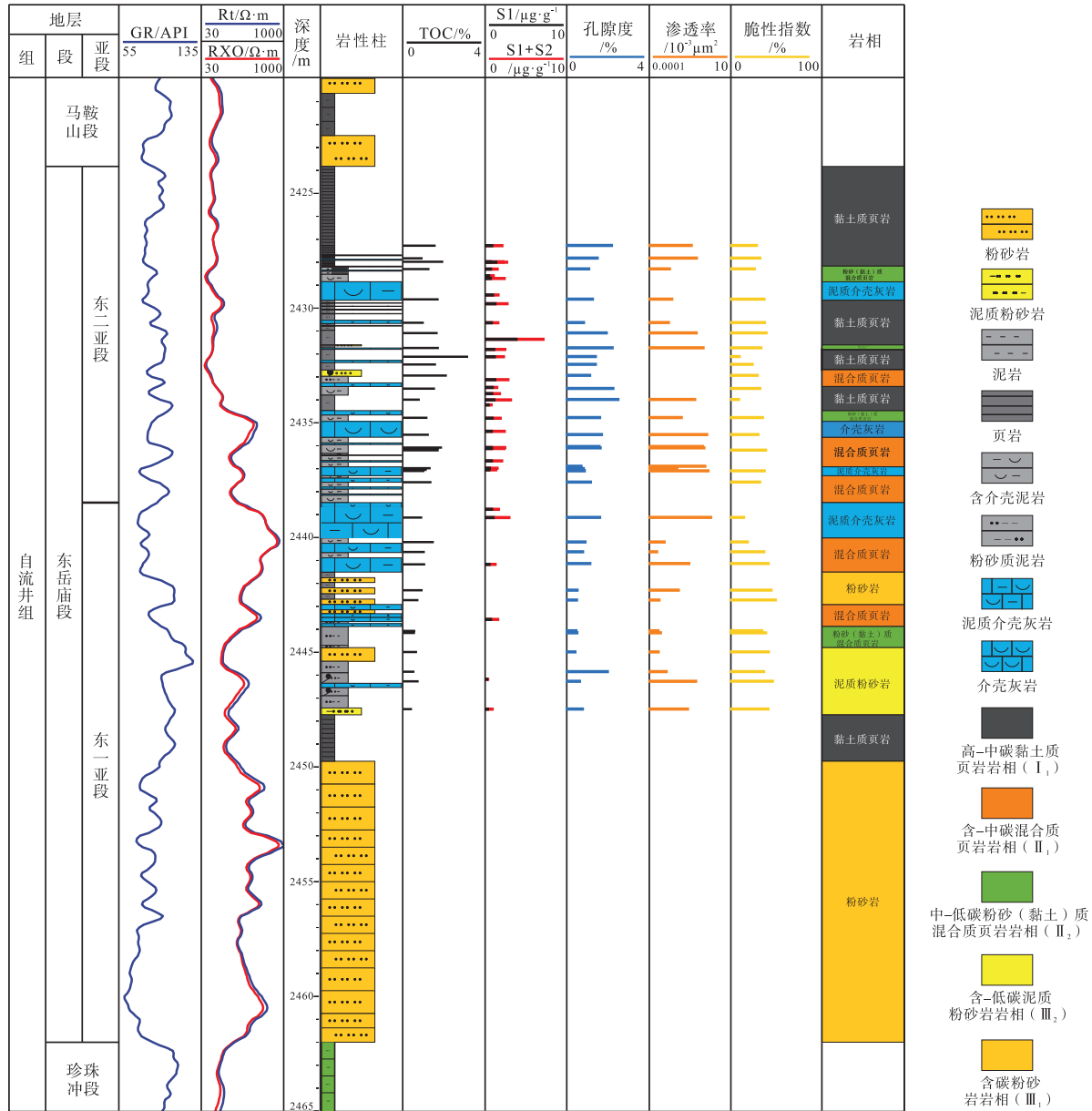


图 11 川东地区 YT1 井侏罗系东岳庙段各地质参数及岩相柱状图

Fig. 11 Geological parameters and lithofacies histogram in the Jurassic Dongyuemiao Member of Well YT1 of eastern Sichuan Basin

碳混合质页岩 (II₁) 较差, 中—低碳泥质粉砂岩 (III₂) 最差; 结合研究区页岩岩相的纵向分布规律, 东二亚段中上部是川东地区东岳庙段储集层的优选层位。

参考文献 (References)

曹香妮, 姜振学, 朱德宇, 仇恒远, 陈磊, 罗东东, 双子俊, 李维邦. 2019. 川东北地区自流井组陆相页岩岩相类型及储层发育特征. 天然气地球科学, 30(12): 1782-1793. [Cao X L, Jiang Z X, Zhu D Y, Qiu H Y, Chen L, Luo D D, Suang Z J, Li W B. 2019. Lithofacies types and reservoir characteristics of continental shales of Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin. Natural Gas Geosci-

ence, 30(12): 1782-1793]

陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 刘洪林, 魏伟, 方俊华. 2012. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义. 煤炭学报, 37(3): 438-444. [Chen S B, Zhu Y M, Wang G Y, Liu H L, Wei W, Fang J H. 2012. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin. Journal of China Coal Society, 37(3): 438-444]

付小平, 杨滔. 2021. 川东北地区下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙结构特征. 石油实验地质, 43(4): 589-598. [Fu X P, Yang T. 2021. Pore structure of continental shale reservoirs in Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 43(4): 589-598]

谷渊涛, 李晓霞, 万泉, 杨曙光. 2021. 页岩有机质孔隙差异特征及影

- 响因素分析: 以我国典型海相、陆相、过渡相储层为例. 沉积学报, 39(4): 794-810. [Gu Y T, Li X X, Wan Q, Yang S G. 2021. On the different characteristics of organic pores in shale and their influencing factors: taking typical marine, continental, and transitional facies reservoirs in China as examples. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 794-810]
- 郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 李宇平. 2016. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响. 石油与天然气地质, 37(6): 799-808. [Guo X S, Hu D F, Wei X F, Li Y P. 2016. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin. *Oil and Gas Geology*, 37(6): 799-808]
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社. [Guo Z W, Deng K L, Han Y H. 1996. *The Formation and Development of Sichuan Basin*. Beijing: Geological Publishing House]
- 韩云. 2018. 东营凹陷含盐页岩微观特征及其控制因素分析. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Han Y. 2018. *Microscopic characteristics and controlling factors of saliferous shales in the Dongying sag*. Masteral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 田方, 滕建彬, 李博. 2012. 非常规油气勘探领域页岩综合分类命名方案探讨. 油气地质与采收率, 19(6): 16-19, 24, 112. [Hao Y Q, Xie Z H, Zhou Z L, Tian F, Teng J B, Li B. 2012. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 19(6): 16-19, 24, 112]
- 何江林, 陈正辉, 董大忠, 孙莎莎, 王志国. 2022. 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析. 沉积与特提斯地质, 42(3): 385-397. [He J L, Chen Z H, Dong D Z, Sun S S, Wang Z G. 2022. The evolution of sedimentary environments of Dongyuemiao Member and key factors for enrichment of shale oil and gas, northeastern Sichuan Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(3): 385-397]
- 何云鹏, 杨水金. 2018. BET比表面积法在材料研究中的应用. 精细石油化工进展, 19(4): 52-56. [He Y P, Yang S J. 2018. Application of BET specific surface area method in materials research. *Advances in Fine Petrochemicals*, 19(4): 52-56]
- 胡宗全, 王濡岳, 路菁, 冯动军, 刘粤蛟, 申宝剑, 刘忠宝, 王冠平, 何建华. 2023. 陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式. 石油与天然气地质, 44(6): 1393-1404. [Hu Z Q, Wang R Y, Lu J, Feng D J, Liu Y J, Shen B J, Liu Z B, Wang G P, He J H. 2023. Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1393-1404]
- 冀昆. 2014. 页岩气储层压前综合评价技术. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Ji K. 2014. *Facability evaluation of shale gas reservoirs based on well logging data*. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 姜涛, 金之钧, 刘光祥, 胡宗全, 刘全有, 刘忠宝, 王鹏威, 王濡岳, 杨滔, 王冠平. 2021. 四川盆地元坝地区自流井组页岩储层孔隙结构特征. 石油与天然气地质, 42(4): 909-918. [Jiang T, Jin Z J, Liu G X, Hu Z Q, Liu Q Y, Liu Z B, Wang P W, Wang N Y, Yang T, Wang G P. 2021. Pore structure characteristics of shale reservoirs in the Ziliujing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 909-918]
- 据宜文, 卜红玲, 王国昌. 2014. 页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响. 地球科学进展, 29(4): 492-506. [Ju Y W, Bu H L, Wang G C. 2014. Main characteristics of shale gas reservoir and its effect on the reservoir reconstruction. *Advances in Earth Science*, 29(4): 492-506]
- 康家豪, 王兴志, 谢圣阳, 曾德铭, 杜垚, 张芮, 张少敏, 李阳. 2022. 川中地区侏罗系大安寨段页岩岩相类型及储层特征. 岩性油气藏, 34(4): 53-65. [Kang J H, Wang X Z, Xie S Y, Zeng D M, Du H, Zhang R, Zhang S M, Li Y. 2022. Lithofacies types and reservoir characteristics of shales of Jurassic Da'anzhai member in central Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 34(4): 53-65]
- 李成成, 周世新, 李靖, 杨亚南, 付德亮, 马瑜, 李源遵. 2017. 鄂尔多斯盆地南部延长组页岩孔隙特征及其控制因素. 沉积学报, 35(2): 315-329. [Li C C, Zhou S X, Li J, Yang Y A, Fu D L, Ma Y, Li Y P. 2017. Pore characteristics and controlling factors of the Yanchang Formation mudstone and shale in the South of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 315-329]
- 李可, 王兴志, 张馨艺, 要继超, 吴清民. 2016. 四川盆地东部下志留统龙马溪组页岩储层特征及影响因素. 岩性油气藏, 28(5): 52-58. [Li K, Wang X Z, Zhang X Y, Yao J C, Wu Q M. 2016. Shale reservoir characteristics and influencing factors of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the eastern Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 28(5): 52-58]
- 李晓霞, 谷渊涛, 万泉, 杨曙光. 2023. 泥页岩中有机质-黏土复合体的微观结构、变形作用及源-储意义. 石油与天然气地质, 44(2): 452-467. [Li X X, Gu Y T, Wan Q, Yang S G. 2023. Micro-architecture, deformation and source-reservoir significance of organic-clay composites in shale. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 452-467]
- 李旭, 徐蒙, 蔡进功, 范明, 刘伟新. 2019. 东营凹陷页岩孔隙结构特征及其演化规律. 油气地质与采收率, 26(1): 88-100. [Li X, Xu M, Cai J G, Fan M, Liu W X. 2019. Structure characteristics and evolution characteristics of pores in mud shale in Dongying sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(1): 88-100]
- 李英强, 何登发. 2014. 四川盆地及邻区早侏罗世构造-沉积环境与原型盆地演化. 石油学报, 35(1): 219-232. [Li Y Q, He D F. 2014. Evolution of tectonic-depositional environment and prototype basins of the Early Jurassic in Sichuan Basin and adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 219-232]
- 李长海, 赵伦, 刘波, 陈强, 陆成, 孔悦. 2020. 微裂缝研究进展、意义及发展趋势. 天然气地球科学, 31(3): 402-416. [Li C H, Zhao L, Liu B, Chen Q, Lu C, Kong Y. 2020. Research status, significance and development trend of microfractures. *Natural Gas Geoscience*, 31(3): 402-416]
- 刘树根, 汪华, 孙玮, 代寒松, 秦川. 2008. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析. 石油与天然气地质, 29(6): 781-792, 818. [Liu S G, Wang H, Sun W, Dai H S, Qin C. 2008. Analysis on special features of petroleum geological conditions of marine facies in Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 29(6): 781-792, 818]
- 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 冯动军, 朱彤, 边瑞康, 姜涛, 金光光. 2019. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义: 以四川盆地中下侏罗统为例. 天然气工业, 39(12): 10-21. [Liu Z B, Liu G X, Hu Z Q, Feng D J, Zhu T, Bian R K, Jiang T, Jing Z G.

2019. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: a case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 39(12): 10-21]
- 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 李鹏, 王鹏威, 李倩文, 金治光, 张哲. 2022. 陆相页岩源—储耦合特征及发育模式: 以四川盆地侏罗系自流井组为例. *海相油气地质*, 27(3): 271-280. [Liu Z B, Hu Z Q, Liu G X, Li P, Wang P W, Li Q W, Jin Z G, Zhang Z. 2022. Source-reservoir coupling characteristics and development model of continental shale: taking the Jurassic Ziliujing Formation in Sichuan Basin as an example. *Marine Origin Petroleum Geology*, 27(3): 271-280]
- 罗超, 刘树根, 孙玮, 冉波, 王世玉, 杨迪, 白志强, 叶玥豪, 张旋, 邓宾. 2014. 鄂西—渝东地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩孔隙结构特征. *东北石油大学学报*, 38(2): 8-17, 79, 5-6. [Luo C, Liu S G, Sun W, Ran B, Wang S Y, Yang D, Bai Z Q, Ye Y H, Zhang X, Deng B. 2014. Pore structure characterization of black shale in the lower Cambrian Niutitang Formation in western Hubei and eastern Chongqing area. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(2): 8-17, 79, 5-6]
- 马妍. 2018. 有机酸生成及其对储层溶蚀的定量表征和应用. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Ma Y. 2018. Quantitative characterization and application of organic acid generation and its dissolution to reservoirs. Masteral dissertation of China University of Petroleum(East China)]
- 聂海宽, 马鑫, 余川, 叶欣, 边瑞康, 刘忠宝. 2017. 川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价. *石油与天然气地质*, 38(3): 438-447. [Nie H K, Ma X, Yu C, Ye X, Bian R K, Liu Z B. 2017. Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(3): 438-447]
- 舒志国, 周林, 李雄, 刘皓天, 曾勇, 谢洪光, 姚明君, 王艳春. 2021. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景. *石油与天然气地质*, 42(1): 212-223. [Shu Z G, Zhou L, Li X, Liu H T, Zeng Y, Xie H G, Yao M J, Wang Y C. 2021. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, the eastern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 212-223]
- 舒志国, 舒逸, 陈绵琨, 彭伟, 刘皓天, 肖雄. 2024. 陆相页岩岩相非均质性及其对储层孔隙发育特征: 以四川盆地自流井组东岳庙段页岩为例. *地质科技通报*, 43(2): 1-15. [Shu Z G, Shu Y, Chen M K, Peng W, Liu H T, Xiao X. 2023. Lithofacies heterogeneity and reservoir pore development characteristics of continental shale: a case study of Dongyuemiao shale of Ziliujing Formation in Sichuan Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(2): 1-15]
- 孙越, 蒋裕强, 谷一凡. 2023. 涪陵地区东岳庙段陆相页岩储层微观孔隙结构与连通性评价. 见: 第十七届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集. 专题 14 页岩油气储层形成机理与表征技术. [Sun Y, Jiang Y Q, Gu Y F. 2023. Evaluation of microporosity structure and connectivity of terrestrial shale reservoirs in Dongyuemiao section, Fuling area. In: Abstracts of the 17th National Conference on Paleogeography and Sedimentology-Topic 14: Mechanisms of shale oil and gas reservoir formation and characterization techniques]
- 汪虎, 何治亮, 张永贵, 苏坤, 王濡岳, 赵聪会. 2019. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响. *石油与天然气地质*, 40(1): 41-49. [Wang H, He Z L, Zhang Y G, Su K, Wang R Y, Zhao C H. 2019. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property. *Oil & Gas Geology*, 40(1): 41-49]
- 王宏语, 杨润泽, 张峰, 张斌. 2018. 富含有机质泥页岩岩相表征的研究现状与趋势. *地质科技情报*, 37(2): 141-148. [Wang H Y, Yang R Z, Zhang F, Zhang B. 2018. Research progress and trend of organic-rich shale lithofacies characterization. *Geological Science and Technology Information*, 37(2): 141-148]
- 王峻. 2007. 四川盆地上三叠统一侏罗系沉积体系及层序地层学研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Wang J. 2007. Study on the depositional system and sequence stratigraphy of Upper Triassic-Jurassic in Sichuan Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 王倩茹, 陶士振, 关平. 2020. 中国陆相盆地页岩油研究及勘探开发进展. *天然气地球科学*, 31(3): 417-427. [Wang Q R, Tao S Z, Guan P. 2020. Progress in research and exploration & development of shale oil in continental basins in China. *Natural Gas Geoscience*, 31(3): 417-427]
- 王同, 熊亮, 徐猛, 董晓霞, 周瑞琦, 付晓宁. 2016. 川南地区下寒武统筇竹寺组页岩储层特征. *石油实验地质*, 38(2): 197-203. [Wang T, Xiong L, Xu M, Dong X X, Zhou R Q, Fu X N. 2016. Shale reservoir characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(2): 197-203]
- 王晓梅, 张水昌, 王华建, 苏劲, 何坤, 王宇, 王晓琦. 2017. 烃源岩非均质性及其意义: 以中国元古界下马岭组页岩为例. *石油勘探与开发*, 44(1): 32-39. [Wang X M, Zhang S C, Wang H J, Sun J, He K, Wang Y, Wang X Q. 2017. Significance of source rock heterogeneities: a case study of Mesoproterozoic maling Formation shale in North China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 32-39]
- 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 梁兴. 2013. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素: 以川南—黔北 XX 地区龙马溪组为例. *天然气地球科学*, 24(5): 1048-1059. [Wei X F, Liu R B, Zhang T S, Liang X. 2013. Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: a case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou. *Natural Gas Geoscience*, 24(5): 1048-1059]
- 徐浩. 2019. 南海相页岩储层微观孔隙表征方法及含气特征分析. 成都理工大学博士学位论文. [Xu H. 2019. Micropores characterization method and gas content analysis for marine shale reservoirs in southern China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 薛莲花, 杨巍, 仲佳爱, 徐勇, 陈国俊. 2015. 富有机质页岩生烃阶段孔隙演化: 来自鄂尔多斯延长组地质条件约束下的热模拟实验证据. *地质学报*, 89(5): 970-978. [Xue L H, Yang W, Zhong J A, Xu Y, Chen G J. 2015. Porous evolution of the organic-rich shale from simulated experiment with geological constrains, samples from Yanchang Formation in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 970-978]

- 杨超,张金川,李婉君,荆铁亚,孙睿,王中鹏,何伟,卢亚亚. 2014. 辽河坳陷沙三、沙四段页岩微观孔隙特征及其成藏意义. 石油与天然气地质, 35(2): 286-294. [Yang C, Zhang J, Li W J, Jing T Y, Sun R, Wang Z P, He W, Lu Y Y. 2014. Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression. Oil & Gas Geology, 35(2): 286-294]
- 杨超. 2017. 页岩有机质孔隙发育特征及主控因素. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Yang C. 2017. The developmental characteristics and controlling factors of organic-associated pores in organic-rich shales. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 杨峰,宁正福,胡昌蓬,王波,彭凯,刘慧卿. 2013. 页岩储层微观孔隙结构特征. 石油学报, 34(2): 301-311. [Yang F, Ning Z F, Hu C P, Wang B, Peng K, Liu H J. 2013. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs. Acta Petrolei Sinica, 34(2): 301-311]
- 杨锐. 2018. 鄂西渝东地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙结构与连通孔隙流体示踪. 中国地质大学博士论文. [Yang R. 2018. Pore structure and tracer-containing fluid migration in connected pores of Wufeng and Longmaxi shales from western Hubei and eastern Chongqing regions. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 张平. 2023. 东营凹陷页岩中有机质与无机矿物相互作用及孔隙特征研究. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Zhang P. 2023. Study on the interaction between organic matter and inorganic minerals and pore characteristics in shale of Dongying Depression. Masteral dissertation of China University of Petroleum(East China)]
- 张顺. 2018. 东营凹陷页岩储层成岩作用及增孔和减孔机制. 中国矿业大学学报, 47(3): 562-578. [Zhang S. 2018. Diagenesis and mechanism of shale reservoir pore increase and reduction in Dongying sag. Journal of China University of Mining & Technology, 47(3): 562-578]
- 张晓明,石万忠,徐清海,王任,徐壮,王健,王超,袁琪. 2015. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素. 石油学报, 36(8): 926-939, 953. [Zhang X M, Shi W Z, Xu Q H, Wang R, Xu Z, Wang J, Wang C, Yuan Q. 2015. Reservoir characteristics and controlling factors of shale gas in Jiaoshiba area, Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(8): 926-939, 953]
- 赵靖舟. 2012. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力. 天然气地球科学, 23(3): 393-406. [Zhao J Z. 2012. Conception, classification and resource potential of unconventional hydrocarbons. Natural Gas Geoscience, 23(3): 393-406]
- 赵文智,朱如凯,刘伟,白斌,吴松涛,卞从胜,张婧雅,刘畅,李永新,卢明辉,刘忠华,董劲. 2023. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展. 石油科学通报, 8(4): 373-390. [Zhao W Z, Zhu R K, Liu W, Bai B, Wu S T, Bian C S, Zhang J Y, Liu C, Li Y X, Lu M H, Liu Z H, Dong J. 2023. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China. Petroleum Science Bulletin, 8(4): 373-390]
- 周圆圆,芮晓庆,鲍芳,俞凌杰,张庆珍,席斌斌. 2023. 四川盆地侏罗系陆相页岩成熟度与显微组分孔隙发育特征. 西安石油大学学报(自然科学版), 38(3): 27-37, 80. [Zhou Y Y, Rui X Q, Bao F, Yu L J, Zhang Q Z, Xi B B. 2023. Thermal Maturity and Pore Characteristics of Jurassic Continental Shale in Sichuan Basin. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 38(3): 27-37, 80]
- 朱庆山,黄文来,周素红,邹涛,李凤霞,王勇,谢朝晖. 2008. 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第2部分: 气体吸附法分析介孔和大孔. 中华人民共和国国家标准. [Zhu Q S, Huang W L, Zhou S H, Zou T, Li F X, Wang Y, Xie Z H. 2008. Determination of pore size distribution and porosity of solid materials by mercuric pressure and gas adsorption methods Part 2: Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption. National Standard of the People's Republic of China]
- 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37(6): 641-653. [Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H, Cheng K M. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 641-653]
- 邹才能,张国生,杨智,陶士振,侯连华,朱如凯,袁选俊,冉启全,李登华,王志平. 2013. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学. 石油勘探与开发, 40(4): 385-399, 454. [Zou C N, Zhang G S, Yang Z, Tao S Z, Hou L H, Zhu R K, Yuan X J, Ran Q Q, Li D H, Wang Z P. 2013. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: on unconventional petroleum geology. Petroleum Exploration and Development, 40(4): 385-399, 454]
- 邹才能,杨智,王红岩,董大忠,刘洪林,施振生,张斌,孙莎莎,刘德勋,李贵中,吴松涛,庞正炼,潘松圻,袁懿琳. 2019. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田. 地质学报, 93(7): 1551-1562. [Zou C N, Yang Z, Wang H Y, Dong D Z, Liu H L, Shi Z S, Zhang B, Sun S S, Liu D X, Li G Z, Wu S T, Pang Z L, Pan S Q, Yuan Y L. 2019. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin, China. Acta Geologica Sinica, 93(7): 1551-1562]
- De Boer J H. 1958. The Structure and Properties of Porous Materials. London: Butterworths.
- Sing W S K. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). Pure and Applied Chemistry, 57(4): 603-619.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)