

东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩 沉积环境及成岩演化*

张 顺^{1,2}

1 中国石化胜利油田勘探开发研究院, 山东东营 257015
2 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206

摘 要 以济阳坳陷东营凹陷民丰洼陷沙河街组四段上亚段 (简称“沙四上亚段”) 页岩为研究对象, 利用岩心观察、薄片观察和元素分析等方法恢复沉积古环境, 创新融合 SEM-CL、FIB-SEM、LA-ICP-MS、同位素、包裹体及 U-Pb 定年等方法, 明确页岩典型成岩矿物演化特征和成储机制。结果表明: 民丰洼陷沙四上亚段页岩沉积期属于干旱—半湿润气候, 总体为咸水、深湖、强还原的细粒沉积环境, 纵向高频旋回性特征显著, 呈现由碳酸盐质混合页岩占主导到三端元矿物均匀混合页岩、再到长英质混合页岩占比增加的变化特点; TOC 集中在 1.8%~6%, 高沉积速率、强物源供给使有机质大量富集而不完全依赖长期缺氧保存环境; 颗粒状方解石的稀土元素分配特征、碳氧同位素值以及 U-Pb 年龄等与纤维状方解石存在较明显差异, 总体上, 近水平方向柱纤状方解石纹层表现出较宽幅的年龄跨度 (31.2±4.3~25.1±4.2 Ma), 对应早成岩—中成岩的完整演化阶段; 自生石英在泥质纹层和方解石纹层中普遍发育, 蒙脱石向伊利石转化 (伊利石含量集中在 80%~100%)、长石等硅酸盐矿物溶解释放的硅质是页岩自生石英主要的硅质来源; 在超压背景下, 自生石英与重结晶方解石协同维持孔隙空间, 缓解了因过度胶结对孔隙保存的破坏作用, 为成岩体系偏酸性流体的溶蚀增孔提供了有利成储条件。

关键词 细粒沉积环境 成岩演化 混合页岩 民丰洼陷 东营凹陷

作者简介 张顺, 男, 1985 年生, 博士, 从事沉积学及储层地质学研究。E-mail: satisfactoryshun@163.com。

中图分类号: P618.130.2; TE122.2 **文献标志码**: A

Sedimentary environment and diagenetic evolution of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

ZHANG Shun^{1,2}

1 Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield, Shandong Dongying 257015, China

2 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China

Abstract This study investigates the shale of the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in the Minfeng subsag, Dongying sag, integrating core and thin-section observations with

* 国家科技重大专项项目 (编号: 2024ZD1400100), 国家自然科学基金企业创新联合发展基金项目 (编号: U24B6002), 中石化股份公司科研项目 (编号: KLP25024, P23084) 联合资助。 [Co-funded by the National Science and Technology Oil & Gas Major Project (No. 2024ZD1400100), the National Natural Science Foundation of China Corporate Innovation and Development Joint Fund Intergration Project (No. U24B6002) and the Science and Technology Project of China Petroleum & Chemical Corporation (Nos. KLP25024, P23084)]

收稿日期: 2026-01-06 改回日期: 2026-03-23

elemental geochemistry to reconstruct paleoenvironmental conditions. An innovative multi-method analytical framework was employed—including scanning electron microscopy coupled with cathodoluminescence (SEM-CL), focused ion beam-scanning electron microscopy (FIB-SEM), laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), stable isotope (C, O, Sr) analysis, fluid inclusion microthermometry, and U-Pb geochronology—to systematically characterize diagenetic mineral evolution and elucidate the reservoir formation mechanism. Results indicate that deposition of the target interval occurred under an arid to semi-humid climate, within a fine-grained, brackish-deep lacustrine setting characterized by strong redox stratification. High-frequency vertical cyclicity is evident, reflecting a progressive facies transition from carbonate-rich mixed shale → mixed shale → feldspar-rich mixed shale. Total organic carbon (TOC) ranges predominantly between 1.8wt% and 6.0 wt%, with abundant organic matter accumulation attributed primarily to high sedimentation rates and robust terrigenous and/or endogenous organic input—rather than prolonged bottom-water anoxia alone. Granular calcite and fibrous calcite exhibit distinct geochemical signatures: divergent rare earth element (REE) patterns, contrasting $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, and significantly different U-Pb ages. Notably, columnar-to-fibrous calcite laminae oriented near-horizontally yield a broad U-Pb age spectrum (31.2 ± 4.3 Ma to 25.1 ± 4.2 Ma), spanning the full early-to-middle diagenetic interval. Illite comprises 80% ~ 100% of the clay mineral assemblage; its formation is dominantly controlled by montmorillonite-to-illite transformation, while feldspar dissolution represents a major silica source for authigenic quartz precipitation. Authigenic quartz is ubiquitously observed within argillaceous laminae and calcite laminae. Under overpressured conditions, co-precipitation of authigenic quartz and recrystallized calcite effectively buffered porosity loss during cementation—thereby preserving critical pore space and facilitating subsequent pore enhancement via acidic fluid dissolution during later diagenesis. This interplay constitutes a key reservoir-quality preservation and improvement mechanism in deeply buried lacustrine shales.

Key words fine-grained sedimentary environment, diagenetic evolution, mixed shale, Minfeng subsag, Dongying sag

About the author ZHANG Shun, born in 1985, holds a Ph.D. and is engaged in researches on sedimentology and reservoir geology. E-mail: satisfactoryshun@163.com.

0 引言

中国目前已经在多个盆地中相继实现了陆相页岩油的勘探突破（马永生等，2022；刘惠民等，2022）。济阳坳陷是典型的陆相断陷盆地，古近系厚层富有机质页岩广泛发育，胜利油田从 2006 年开始关注世界页岩油气的进展，先后经历了“主动探索—创新突破—评价试验”3 个阶段（刘惠民等，2022；杨勇等，2024），从实践—认识—再实践—再认识，取得济阳页岩油战略性重大突破。据最新资源评价结果，济阳坳陷页岩油总资源量超过 100 亿吨（张奎华等，2024），东营凹陷页岩油资源量超过 78 亿吨，主要分布在富油洼陷古近系沙河街组四段上亚段（以下简称“沙四上亚段”）和沙河街组三段下亚段，其中沙四上亚段占比达

80%。民丰洼陷位于东营凹陷北带东段，大量取心井分析资料表明，不同于更早取得页岩油勘探突破的牛庄洼陷、博兴洼陷富碳酸盐页岩，民丰洼陷沙四上亚段页岩三端元矿物含量多数未超过 50%，按照现有陆相断陷盆地页岩岩相划分方案（姜在兴等，2014；刘惠民等，2023），属于典型的混合类页岩。2022 年 FY1HF 井取得高产稳产突破，通过地质认识迭代，页岩油勘探继续向东、向南、向北（老井试油）展开，相继在不同构造部位取得高产，展示了混合类页岩油巨大的勘探潜力，因此，民丰洼陷是页岩油高产、稳产和未来增储的重要地区，加强对东营凹陷民丰洼陷混合类页岩的基础地质研究对下一步页岩油勘探开发有重要的指导作用。

细粒混合沉积岩的核心特征在于多组分的混合共存,作为陆相、海相沉积环境均广泛发育的岩石类型,其成因机制复杂且与非常规油气资源勘探开发关系密切,目前主要从成分结构的混合机制、沉积环境、成岩作用与油气地质意义等方面开展相关研究(陈世悦等,2017;郭英海等,2021;刘惠民等,2022;黄军平等,2023),陆相页岩既有物质成分的混合,也有结构的混合,混合沉积作用类型包括均匀混合、纹层叠置混合、不均匀团块状混合等。此次研究的混合类页岩属于前人提及的细粒混合沉积岩中的狭义混合部分(陈世悦等,2017;郭英海等,2021)中三端元矿物质量百分含量均未超过50%的细粒混合类沉积岩。目前对东营凹陷古近系页岩沉积环境和成岩特征的研究成果多集中在南部的博兴和牛庄洼陷,诸多专家和研究人员在富碳酸盐页岩(方解石等碳酸盐矿物含量集中在50%~90%)的沉积环境恢复(姜在兴等,2014;杨万芹,2018;滕建彬,2024)、岩相类型及分布(张顺等,2017,2022;王勇,2024)、方解石成因(马存飞等,2016;Zhang *et al.*, 2022)及孔隙演化(Liu *et al.*, 2017;包友书,2019;滕建彬等,2022;王伟庆等,2025;倪良田等,2025)等方面做了积极有益的探索,并指导了2个洼陷富碳酸盐页岩油勘探的重大突破,但对混合类页岩的古环境及成岩演化研究相对较匮乏。

民丰洼陷沙四上亚段混合类页岩毗邻北部物源供给区,在构造位置、沉积古环境、矿物组成和结构等方面具有显著的特点,深入研究民丰洼陷细粒沉积环境与成岩成储机制,是明确页岩油高效储集体发育规律的重要前提和基础条件。本次聚焦民丰洼陷沙四上亚段页岩层系混合类页岩,在岩心、薄片观察和元素分析恢复古环境的基础上,创新融合SEM-CL、FIB-SEM、LA-ICP-MS、同位素、包裹体及U-Pb定年等多方法技术,明确民丰洼陷混合类页岩成岩矿物演化特征,建立碳酸盐质混合类页岩的成岩演化序列和成储模式,以期对下一步页岩油勘探开发工作提供重要的地质依据。

1 地质背景

民丰洼陷地处渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷东北部(谭先锋等,2010;邱贻博等,2020),是东

营凹陷内重要的次级负向构造单元,北邻陈家庄凸起,南接东营凹陷中央断裂带,西与利津洼陷相邻,东抵青坨子凸起,洼陷面积约为800 km²(图1)。从构造单元归属来看,其隶属于东营凹陷北部陡坡带与中央断裂带之间的过渡构造域,受盆地一级构造单元(济阳坳陷)伸展动力学控制。沙四上亚段沉积期(古近纪渐新世早中期)处于渤海湾盆地断陷伸展鼎盛阶段,构造活动以盆地边界断裂持续强烈活动为特征,民丰北、南断裂多期次活动主导洼陷形成了“北深南浅、东陡西缓”的构造格局(周瑶琪等,2011)。

民丰洼陷古近系纵向发育完整、横向分异显著,整体呈“北厚南薄、洼陷中心厚边缘薄”的分布特征。沙河街组自下而上划分为沙四段、沙三段、沙二段及沙一段,总厚度可达2500~4000 m,断裂伸展作用引发盆地深陷,形成孤立封闭的次级洼陷地貌,沙四段至沙三段沉积时期为一个水进—水退过程,沉积相由三角洲相、滨浅湖亚相过渡到半深湖—深湖亚相,再到滨浅湖亚相、三角洲相。沙四上亚段沉积期,洼陷内以半深湖—深湖相细粒沉积为主,沉积速率高达200~400 m/Ma;受干旱—半干旱古气候影响,蒸发作用强烈导致水体盐度偏高(Miao *et al.*, 2024;王勇,2024),封闭的构造环境与强蒸发条件叠加,使水体分层明显,底层还原环境利于有机质富集(TOC含量5%~12%),形成优质烃源岩,也是目前民丰洼陷页岩油勘探开发的主要对象。

2 样品与研究方法

2.1 样品选取与采集

为支撑民丰洼陷沙四上亚段页岩沉积环境和成岩演化特征研究,本次研究针对性选取东营凹陷FY1HF井、FY101HF井、FY3HF井、FY1-11HF井等关键井位的沙四上亚段岩心,在层位和深度上涵盖了目前页岩油勘探开发的重点层段(沙四上亚段纯上次亚段2-3层组、纯下1层组),且在平面上分布在不同构造沉积位置(图1)。开展系统的岩心精细观察与多维度取样分析工作,累计采集岩心样品320块,其中FY101HF井进行了沙四上亚段纯上次亚段(3459.02~3670 m)岩心图像扫描及X射线荧光光谱仪元素扫描。

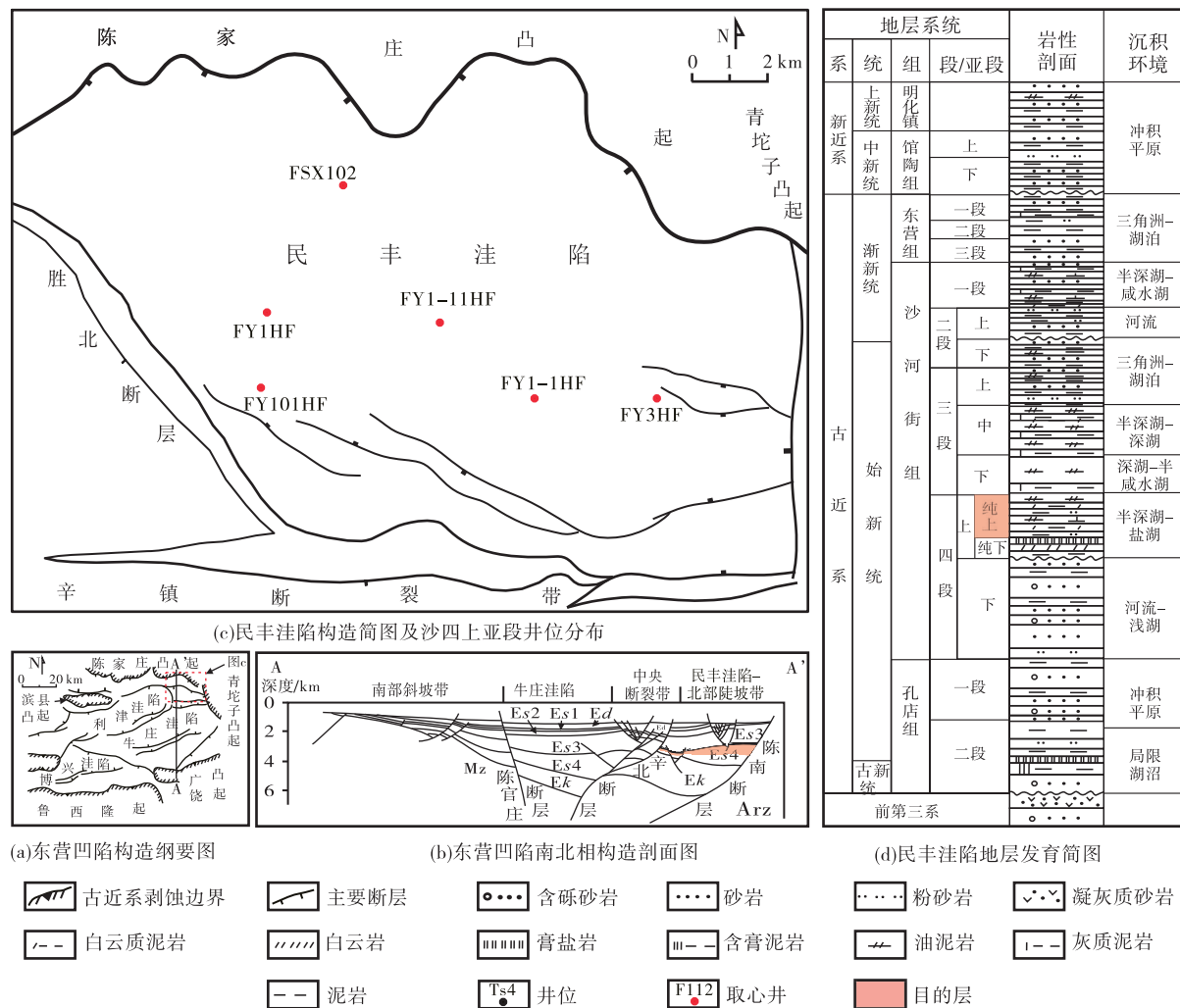


Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic development characteristics of Minfeng subsag, Dongying Sag

2.2 研究方法

在矿物岩石学特征和沉积环境分析方面，采用蔡司显微镜对 120 块岩石薄片进行微观形态与矿物组合观察；借助 SMART LAB 固定靶光管衍射仪完成 96 个样品的 X 射线衍射测试，明确矿物组成特征；微观形貌与大视域分析中，利用 QUAN-TA450FEG 场发射扫描电子显微镜开展 30 个氩离子抛光样品的扫描电镜观察，并通过赛默飞 Scios2 聚焦离子束扫描电子显微镜实现 MAPS 大视域拼接；元素分布特征测试覆盖不同尺度，岩心（总长 1280 m）采用 Geotek 元素及磁化率测试仪进行连续扫描。上述相关测试分析工作在页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室完成。

在成岩流体环境和成岩矿物特征分析方面，以

纹层为研究单元的原位主量元素测试采用日本电子探针（JXA-8230）进行测试（工作电压 15 kV，工作电流 20 nA，束斑直径 2 μm ），原位的微量元素分析利用激光剥蚀质谱 LA-ICP-MS（ImageGEO193）、193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统（Agilent8900-200）完成 3 个样品的原位稀土元素分析，采用电感耦合等离子体多接收质谱（MC-ICP-MS，型号 Neptune Plus）实现高灵敏度检测，不同类型亮晶方解石测试点数量均为 20。流体包裹体显微测温和盐度使用功能显微镜 Axioskop 40A 和 INSTEK 液氮型冷热台 mK1000 检测完成，上述相关测试分析在中国石油大学（华东）深层油气重点实验室完成。

在成岩序列和定年分析方面，方解石 U-Pb 同位素定年在凯来仪器（成都）有限公司利用 LA-

ICP-MS 分析完成,实验采用 New Wave NWR imageGEO193 (TwoVol3) 准分子激光剥蚀系统与 Agilent 8900 ICP-QQQ-MS 联用,设置激光束斑 120 μm 、频率 8 Hz,能量密度约 $3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,预剥蚀时间 4 s;采集时间分辨数据包括约 15 s 空白信号和 30 s 样品信号。数据处理中,使用硅酸盐玻璃标样 NIST614 校正方解石样品及标样 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值,并采用方解石标样 Tarim 进行 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 校正。选用标样 WC-1 ($254.4 \pm 6.4 \text{ Ma}$) 与 Dany-1810a ($232.9 \pm 2.4 \text{ Ma}$) 进行年龄监控。数据离线处理及年龄计算通过 Iolite 完成, Tera-Wasserburg 图解使用 IsoplotR 绘制。此外,本次研究所需的补充岩性描述、地球化学分析等基础数据,均来源于中石化胜利油田勘探开发研究院的实测积累成果,为研究结论的可靠性提供了坚实的数据支撑。

3 沉积环境对岩相发育和有机质富集的控制

3.1 矿物成分、组构及岩相类型

民丰洼陷沙四上亚段页岩多为深灰色、灰黑色,随着长英质与云质含量的提升,色调会逐步向灰褐色、灰色转变;沉积构造以纹层状和层状为主,块状构造罕见(图 2);黏土矿物占比高的页岩中,还能清晰见到页理构造。X 射线衍射全岩矿物分析结果显示,研究区页岩的矿物类型多样,包括黏土矿物、石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、硬石膏、菱铁矿、黄铁矿等多种类型(表 1)。其中黏土矿物的质量分数波动较大,高值可达 40%,平均值接近 30%,且以伊利石和伊蒙混层为主要类型,伊利石含量最高可达 100%;北部近物源区和中部洼陷中心页岩的黏土矿物平均质量分数略高于南部区域。石英矿物的质量分数介于 7%~47%之间,平均值为 23%;长石总质量分数普遍在 8.0%左右,且钾长石含量低于斜长石。碳酸盐矿物的含量在不同样品中差异明显,但整体处于较高水平,其中方解石含量为 25%~50%,(铁)白云石含量为 6%~20%。

总体来看,黏土矿物、长英质矿物、碳酸盐矿物的含量均未超过 50%,且兼具结构上的纹层叠置混积与单个纹层内部成分混积特征(陈世悦等, 2017;郭英海等, 2021),属于富碳酸盐矿物背景

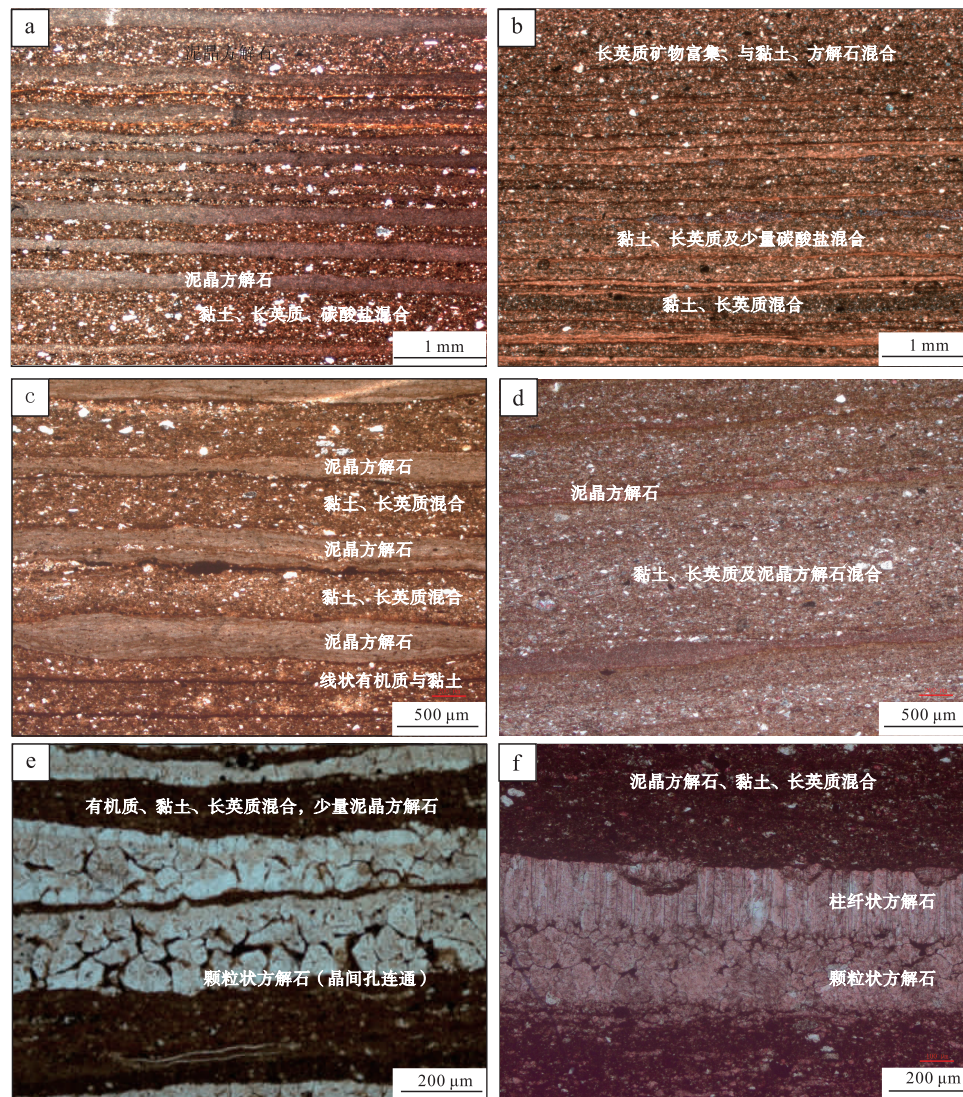
下的细粒混合沉积,纹层状混合类页岩相与层状混合类页岩相是洼陷区的优势岩相。从空间分布规律来看,研究区近物源区域主要发育纹层状长英质混合类页岩,夹有厘米级粉砂岩;向南部延伸过程中,逐渐过渡为纹层状碳酸盐质混合类页岩与富碳酸盐类页岩的组合,碳酸盐矿物的质量分数呈现逐步增加的趋势。

3.2 细粒沉积古环境参数特征

沙四纯上 2-3 层组是民丰洼陷页岩油勘探开发的重点层段,选取 FY101HF 井纯上 2-3 层组开展页岩岩相及沉积环境分析(图 3),综合湖相细粒沉积环境特征及元素地球化学方法调研(杨万芹, 2018;石巨业等, 2023;王必金等, 2025),选用岩心 XRF 元素扫描数据和电子探针元素分析,通过古气候干湿指数 C 值($C \text{ 值} = \frac{\sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co})}{\sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na})}$)、 Sr/Cu 、 Sr/Ba 、 Fe/Mn 值等指标反映古环境特征。

一般地, $C < 0.2$ 指示干旱气候, C 值 0.2~0.4, 指示半干旱气候, C 值 0.4~0.6 指示半湿润气候, > 0.6 指示湿润气候。FY101HF 井沙四纯上页岩层系 C 值从 0.2 到 1.1 均有分布,主体集中在 0.27~0.63,反映半干旱—半湿润为主、局部湿润的古气候特征;硼古盐度集中在 19‰~21‰之间, Sr/Ba 集中在 0.8~4.2 之间,平均值 2,纵向变化较大,反映整体咸水、局部半咸水、盐度频繁变化的特点,并且在 2 层组和 3 层组均呈现从底部至顶部逐渐减小的趋势;洼陷近物源 FSX102 井以及洼陷东部 FY3HF 井沙四上亚段页岩 C 值均显示出相似分布特征。 Fe/Mn 集中在 20~50 之间,指示民丰洼陷整体处于深湖—半深湖环境; V/Cr 介于 1~4 之间代表还原环境, > 4 代表强还原环境,沙四上亚段页岩层系 V/Cr 值集中在 3~7 之间,属于强还原环境。与南部博兴洼陷和牛庄洼陷相比,民丰洼陷气候整体偏湿润,水体咸化程度稍弱,水体整体较深(图 4)。

总体分析,研究区沙四上亚段页岩沉积环境为咸水、深湖、强还原环境,纵向变化较快,物源供给能力较强,沉积环境纵向上高频的旋回性特征显著。受控于气候、水深、物源等沉积环境变化,岩相纵向叠置样式较东营凹陷博兴洼陷、牛庄洼陷更加多样,整体呈现由碳酸盐类页岩与碳酸盐质混合类页岩占主导,到三端元矿物均匀混合页岩再到长



a—纹层状碳酸盐质混合页岩，FY101HF 井，3570.0 m；b—纹层状长英质混合页岩，FY101HF 井，3664.30 m；c—纹层状混合页岩，FY1HF 井，3616.52 m；d—弱纹层状混合页岩，FY1-11HF 井，3420.08 m；e—纹层状碳酸盐质混合页岩，FY101HF 井，3519.9 m；f—柱纤状、颗粒状方解石纹层，FY1-11HF 井，3661.05 m。均为单偏光下照片

图 2 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段典型页岩岩石学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of typical shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

英质混合页岩占比增加的变化特点。具体到 2~5 m 级尺度，也依然体现出碳酸盐矿物含量递减、长英质矿物递增的变化趋势（如 FY101HF 井 3585.3~3583.2 m、3668.3~3664.2 m），反映沉积环境局部的旋回变化特征。咸水介质条件为成岩方解石形成提供充足物质基础，这也是碳酸盐质混合类页岩厚度比例较高的主要原因。

3.3 沉积古环境对有机质富集和成岩的影响

有机质的富集通常受控于初级生产力、沉积速

率、埋藏后的保存状态和有机质来源等（Tyson, 2001; Gingerich, 2021; 石巨业等, 2023; 张瑞等, 2023）。研究区整体临近北部陡坡物源供给区，沉积速率较大，有机质含量整体较高且纵向变化频繁。通常认为，高沉积速率背景下，沉积水体古生产力条件是影响有机质富集的主要因素，FY101HF 井 TOC 含量变化趋势与古水深、氧化还原性等参数纵向变化趋势吻合度一般，其峰值变化更接近于被高频气候所驱动——近物源、干旱气候导致营养盐直接影响瞬时或短期的初级生产力，从而产生短

表 1 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩矿物成分及含量
Table 1 Mineral composition and content of shale in the upper sub-member of Member 4
of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

井号	井深 /m	全岩矿物组分相对含量/wt%									
		黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	石盐	硬石膏	菱铁矿	黄铁矿
FY101HF	3519.3	12.5	28.8	1.9	3.6	35.2	14.4	0	0.6	0	3.0
	3570.0	15.6	26.8	2.5	5.3	34.6	10.9	0	0	0.9	3.4
	3582.2	13.4	30.7	2.0	4.6	35.4	8.7	0	0.4	0	4.8
	3583.2	10.6	34.9	0.6	3.6	39.3	7.9	0	0.2	0	2.9
	3584.2	13.7	35.0	1.0	5.5	35.3	5.0	0	0	0	4.5
	3585.3	10.5	27.6	1.3	5.1	42.5	9.0	0	0.2	0.3	3.5
	3586.3	15.9	26.9	1.0	2.9	39.2	6.8	0	0	2.3	5.0
	3587.2	16.0	29.6	0.7	3.2	35.5	10.7	0	0.6	0	3.7
	3588.1	11.4	23.8	0.8	8.0	42.6	12.0	0	0	0	1.4
	3664.3	23.9	44.5	3.0	10.3	3.9	9.8	0.8	0	0	3.8
	3667.3	21.8	26.9	2.5	5.8	21.0	17.0	0	1.0	0	4.0
	3668.3	13.1	27.9	1.4	4.8	43.9	4.5	0.5	0	0	3.9
FY1-11HF	3420.1	21.1	26.8	3.2	5.3	29.3	6.6	0	1.4	2.7	3.6
	3651.0	8.9	16.6	1.5	7.8	49.9	10.5	0.4	0.5	0.3	3.5
	3661.1	10.2	22.5	1.9	7.3	47.8	3.7	0.6	0.4	0.6	5.1
	3671.8	4.2	7.4	1.0	3.8	73.7	7.0	0.6	0.2	0.7	1.4
	3677.9	5.8	15.3	0.8	7.2	64.9	3.4	0	0.3	0.2	2.1
FY1-1HF	3556.4	40.0	24.0	2.0	3.0	22.0	6.0	0	1.0	1.0	1.0
	3551.8	31.0	16.0	2.0	3.0	39.0	5.0	0	1.0	1.0	2.0
	3668.2	20.0	27.0	0	3.0	36.0	9.0	0	1.0	0	4.0
	3671.8	37.0	23.0	3.0	5.0	16.0	13.0	0	1.0	0	2.0
	3675.0	34.0	19.0	2.0	4.0	30.0	5.0	0	1.0	2.0	3.0
FY1HF	3579.50	22.0	19.0	2.0	7.0	36.0	7.0	0	1.0	1.0	3.0
	3603.52	29.0	24.0	2.0	3.0	33.0	6.0	0	1.0	1.0	1.0
	3609.32	35.0	25.0	3.0	5.0	9.0	21.0	0	1.0	0	1.0
	3616.52	34.0	23.0	2.0	4.0	27.0	6.0	0	1.0	2.0	1.0
	3783.50	20.0	24.0	2.0	3.0	41.0	8.0	0	1.0	0	1.0
FSX102	4013.3	25.8	43.4	1.3	9.0	8.8	3.2	0	0.6	0.2	7.7
	4087.1	13.4	47.0	0.6	3.8	28.3	1.8	0	1.8	0	3.3
	4127.4	7.8	35.1	9.1	26.2	15.0	3.7	0	0.9	0.5	1.7
	4165.0	26.9	38.2	1.8	9.2	6.0	15.6	0	0.7	0.5	1.0
	4223.3	29.8	35.9	0	7.4	18.3	1.4	0	0.3	1.3	5.4

期 TOC 峰，而与保存条件密切相关的底水氧化还原条件（V/Cr）并非在同一节律上波动或没有持续强烈的缺氧，Sr/Cu 值频繁小尺度振荡显示出干湿交替频繁的特征，这进一步表明多数 TOC 含量峰值可能代表同期自生有机质的产出，而不完全依赖长期缺氧保存。此外，许多有机质经历短期的早期成岩作用就被埋藏，沉积过程中快速通过降解作

用强的地带，有机质降解程度弱，最终保存比例较高，呈现 TOC 值整体较高的特点。

前人研究表明，构造活动、海（湖）平面变化、古气候波动等是控制混合沉积作用发生的关键宏观因素，且不同沉积环境下主控因素存在显著差异（黄军平等，2023），并通过水槽实验与沉积模拟技术的应用，发现洪水、风暴、底流等高能事件

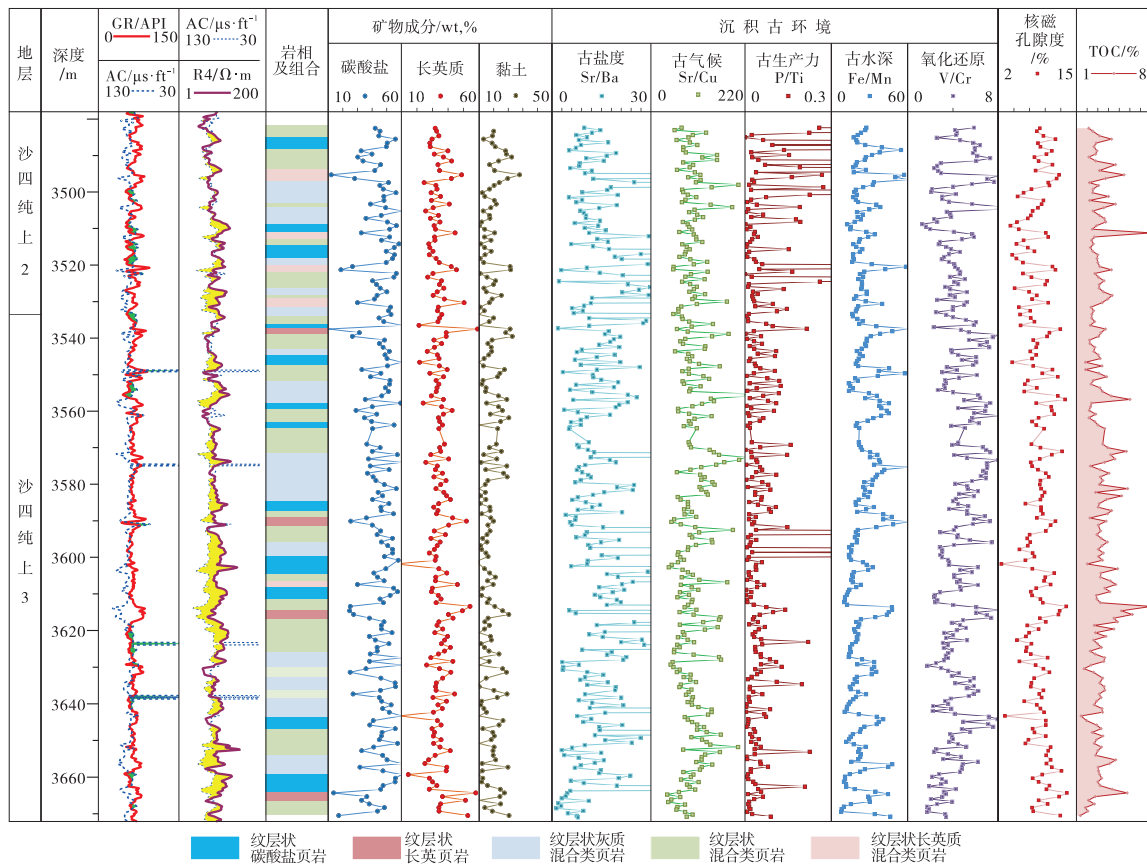


图 3 东营凹陷民丰洼陷 FY101HF 井沙四纯上 2-3 层组页岩沉积古环境及岩相柱状图

Fig. 3 Stratigraphic column of palaeoenvironment and lithofacies of shale in the 2-3 layers of upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Well FY101HF in Minfeng subsag, Dongying sag

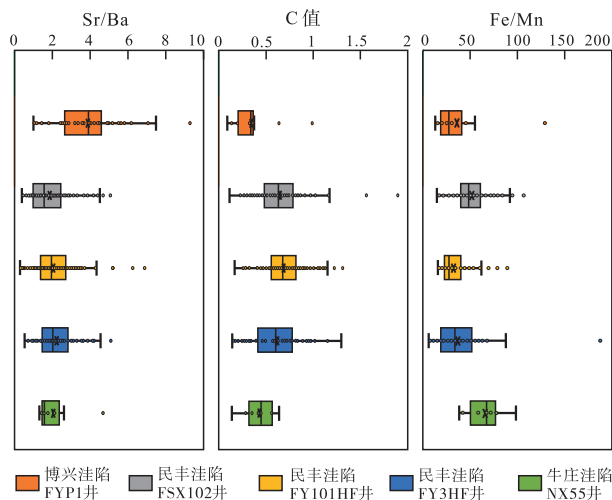


图 4 东营凹陷典型洼陷沙四上亚段页岩 Sr/Ba、C 值及 Fe/Mn 盒须图

Fig. 4 Box plots of Sr/Ba, C values and Fe/Mn of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in typical subsags, Dongying sag

可驱动不同物源细粒物质快速混合沉积；而水体化学条件的周期性变化则会导致陆源碎屑与化学沉淀矿物交替沉积，形成纹层状混积构造。民丰洼陷沙四上亚段沉积期较强的物源供给、高沉积速率提供了丰富细粒物质来源和矿物混合的先决条件，而以半咸水为主、频繁波动的水体环境不仅是纹层发育的基础，也控制了早成岩期偏碱性的成岩流体环境变化。此外，核磁孔隙度的变化趋势与 TOC、长英质矿物含量的变化趋势呈现较好的一致性（图 3），进一步反映了在民丰洼陷沙四上亚段沉积期半干旱—半湿润气候、咸水沉积背景下，高沉积速率、强物源供给对富有机质页岩成岩成储具有显著的控制作用。

4 成岩环境与成岩矿物形成机制

结合岩石薄片分析和扫描电镜观察可知，方解石溶蚀和重结晶、长石溶蚀、黏土矿物转化、自生

石英沉淀等是研究区混合类页岩典型的成岩作用类型(图 2; 图 5)。页岩中的成岩矿物尤其是方解石不仅记录了页岩埋藏演化过程中的温度、压力和流体化学条件的变化,还保存了精确的形成时间信息。在岩心和岩石薄片观察分析的基础上,融合 FIB-SEM、同位素及 U-Pb 定年等方法,明确典型成岩矿物的成岩顺序、温度、时间等,以便进一步探讨混合页岩的成岩演化特征。

4.1 稀土元素揭示的成岩流体环境和成岩期次

稀土元素在碳酸盐矿物中的赋存特征受流体来源、温度、pH 值、氧化还原状态以及矿物-流体反应强度等多因素共同控制。湖盆原始孔隙水中的稀土分布较均匀或略微富集重稀土,随着早成岩阶段碳酸盐的溶解与重结晶作用,轻稀土更容易被方解石吸附进晶格,生物活动与有机质分解产生的有机酸降低孔隙水 pH 值,加速碳酸盐溶解,稀土再沉淀时发生分异,进一步强化轻稀土富集。研究区页岩中颗粒方解石稀土元素总量近 200 $\mu\text{g/g}$,轻重稀土分馏显著 ($\text{LREE/HREE}=3.5\sim 7.9$),球粒陨石标准化配分曲线明显右倾(图 6),大多富集轻稀土元素,这和湖盆沉积早期的成岩反应有关。 δCe 值波动较大,也表明其形成与早成岩阶段受原

始咸化沉积水影响的碱性流体环境密切相关。 δEu 异常为识别成岩体系是否受到热液影响的重要地球化学指标,颗粒状方解石 δEu 值接近 1,未表现明显 Eu 异常,表明成岩过程中未受到显著热液影响。此外,裂缝中充填的重结晶方解石中重稀土元素富集、轻重稀土元素比值低且 δEu 也表现出异常,表现出深埋环境、中成岩阶段成岩流体也可能受热液影响。

纤维状方解石的稀土元素特征与颗粒状方解石明显不同。主要表现在纤维状方解石 ΣREE 含量最低($\Sigma\text{REE}=61.9\ \mu\text{g/g}$),其标准化配分模式表现为轻重稀土分馏弱化, LREE/HREE 值仅为 3.48,不同于早期颗粒状方解石的强烈右倾趋势,反映流体经过更为充分的演化或稀释作用。此外,纤维状方解石中稀土元素表现为明显的正 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.88\sim 3.55$),为高温还原性流体特征信息, Eu^{2+} 优先取代 Ca^{2+} 。该稀土元素组合表明纤维状方解石可能形成于有机质强烈生烃期,水-岩作用强化,导致流体体系从地层水演化为混合型热液流体,进而形成独特的 REE 异常记录。

4.2 流体包裹体反映的成岩温度和流体特征

在稀土元素特征反映成岩流体环境和流体来源基础上,开展流体包裹体分析,进一步揭示成岩温

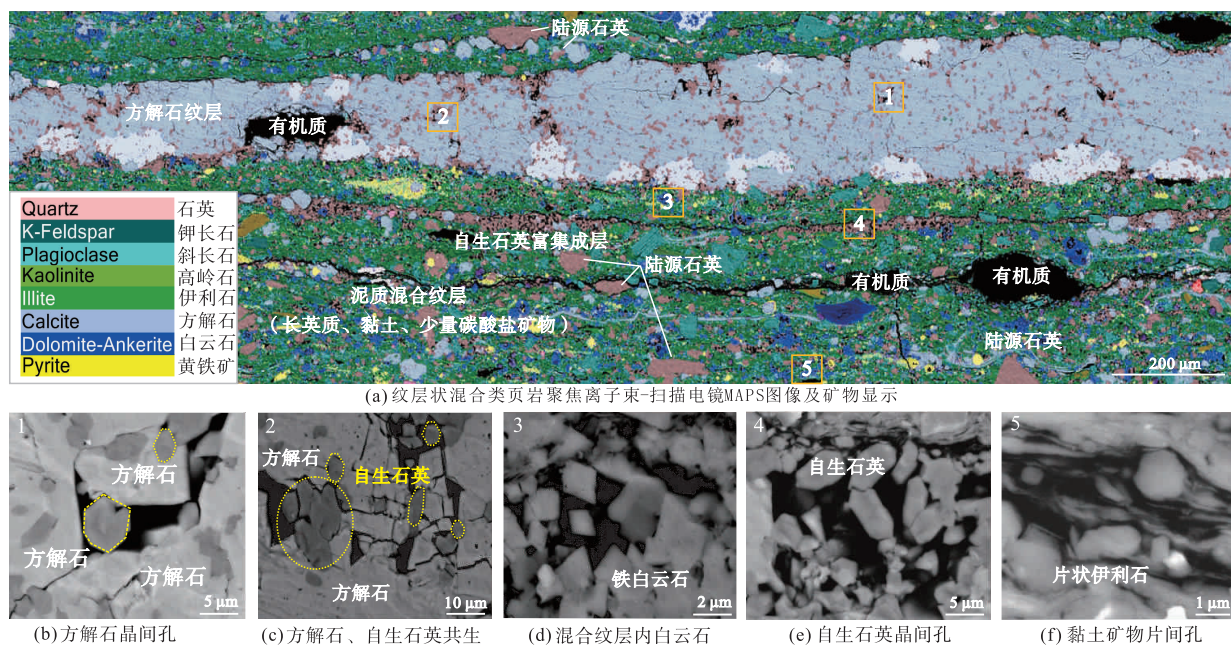


图 5 东营凹陷民丰洼陷混合类页岩样品聚焦离子束-扫描电镜图像、典型成岩现象及孔隙类型

Fig. 5 Mineral distribution, diagenesis and pore types of mixed shale samples by Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscopy, Minfeng subsag, Dongying sag

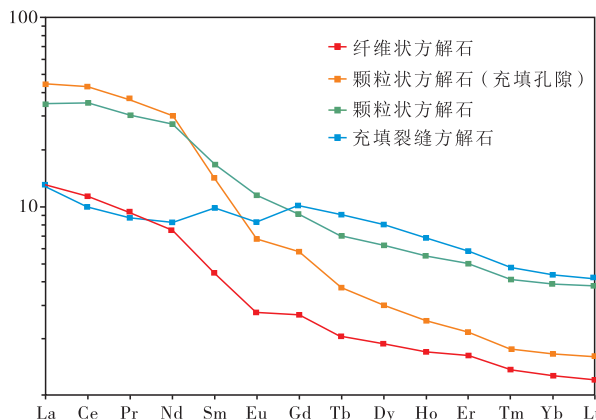


图 6 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩亮晶方解石稀土元素平均值配分曲线 (FY101HF 井)

Fig. 6 Average distribution curves of rare earth elements in sparry calcite of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag (well FY101HF)

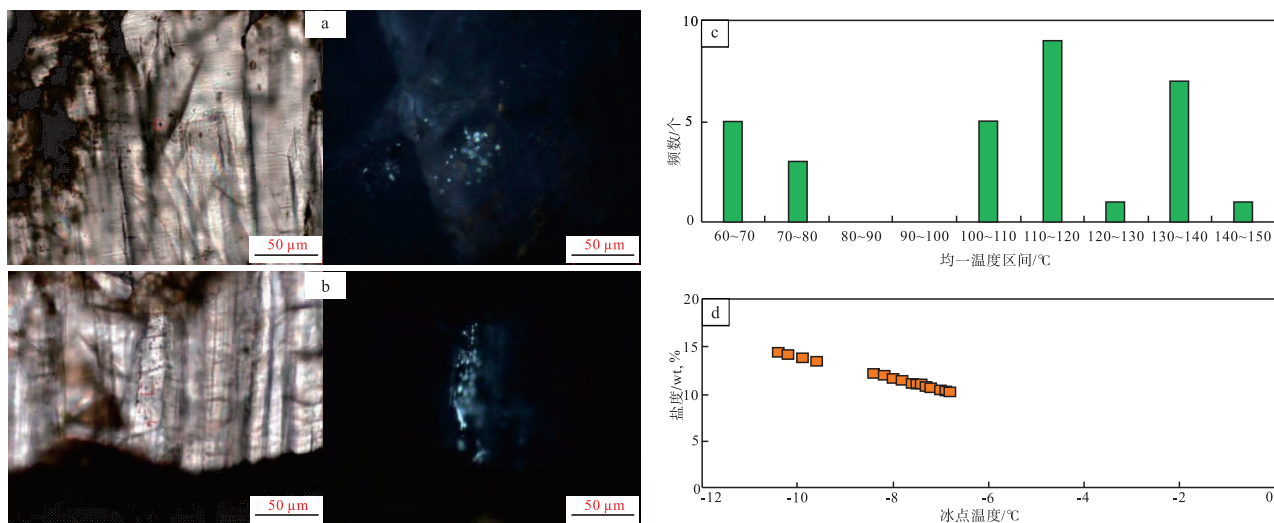
度、成岩流体性质, 反演地质作用过程 (池国祥和卢焕章, 2008; 张顺, 2018; 王鑫等, 2023)。包裹体岩相学观察显示, FY101HF 井页岩样品中烃类及其伴生盐水包裹体主要沿方解石矿物愈合裂隙呈线/带状分布 (图 7), 或在矿物内部均匀、成群分布, 包裹体大小为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$, 呈方形、椭圆形、三角形及不规则状; 偶见包裹体赋存于石英矿物愈合微裂隙中, 呈条带状分布。烃类包裹体透射

光下呈褐色, 紫外光下显蓝色、蓝白色荧光, 反映成熟度较高; 盐水包裹体透射光下为透明无色或浅褐色, 无荧光显示。

烃类伴生盐水包裹体均一温度范围介于 $52 \sim 142^\circ\text{C}$ 之间, 可大体分为 3 个温度区间, 捕获温度跨度大、期次多, 反映民丰洼陷沙四上亚段页岩层系经历多期流体活动, 烃类流体自生成后便通过方解石脉体或石英颗粒支撑的优势通道发生多期次幕式微运移与聚集, 其中 $105 \sim 142^\circ\text{C}$ 是东营组末期区域隆升与再沉降至今地层所经历的温度区间, 揭示了页岩油区别于常规油气的连续性富集特性。此外, 烃类伴生盐水包裹体冰点温度介于 $-10.4 \sim -0.8^\circ\text{C}$ 之间、盐度 $10.24 \text{ wt}\% \sim 14.41 \text{ wt}\%$, 具有高盐度特征, 表明页岩油微运移过程中的伴生无机流体多是高矿化度地层水, 为研究区页岩中方解石溶蚀、重结晶与自生石英生成提供丰富的 Ca^{2+} 与 K^+ , 有助于微运移通道的形成与页岩地层储集性的改善。

4.3 方解石碳氧同位素反映的成岩阶段差异

一般地, 随成岩温度升高 (埋藏加深), 页岩中方解石与流体之间的分馏系数减小, 导致沉淀的方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低 (张顺, 2018), 若方解石 $\delta^{18}\text{O}\text{‰ (VPDB)} < -10\text{‰}$, 代表较高的成岩温度和较



a—FY101HF 井, 3654.9 m, 左图透射光, 右图紫外光, 发蓝白色荧光包裹体赋存于方解石矿物愈合裂隙; b—FY101HF 井, 3797.5 m, 左图透射光, 右图紫外光, 发蓝白色荧光包裹体赋存于碳酸盐脉体晶间缝; c—FY101HF 井, 烃类伴生盐水包裹体均一温度分布区间; d—FY101HF 井, 烃类伴生盐水包裹体冰点温度与盐度关系。a、b 中左右图均为显微荧光光谱仪下的同一视域

图 7 东营凹陷民丰洼陷 FY101HF 井沙四上亚段页岩中流体包裹体照片与捕获特征分析

Fig. 7 Photos of fluid inclusions and analysis of capture characteristics of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Well FY101HF in Minfeng subsag, Dongying sag

强的成岩作用。挑选民丰洼陷沙四上亚段页岩中不同结晶形貌的方解石纹层开展碳氧同位素测试分析, 结果显示, 泥晶方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 集中在 $-7.01\text{‰} \sim -8.09\text{‰}$ 之间, 颗粒状方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -9.05‰ ; 柱纤状方解石氧同位素跨度较大, 集中在 $-9.01\text{‰} \sim -12.13\text{‰}$ 之间, 整体呈现高负值特征, 最高可达 -13.82‰ (表 2)。 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 集中在 $3\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 之间, 最高达 8‰ (表 2), 不同结晶形貌的方解石碳同位素值分布没有明显规律, 通常与有机质的热化学硫酸盐还原作用或甲烷厌氧氧化作用有关。

表 2 东营凹陷民丰洼陷不同类型方解石的碳、氧同位素特征
Table 2 Carbon and Oxygen isotope characteristics of different types of calcite in Minfeng subsag, Dongying sag

不同类型方解石	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
泥晶(围岩)方解石	2.19	-7.35
	3.85	-8.09
	4.72	-7.40
	5.25	-7.01
颗粒状方解石	3.82	-9.05
	3.95	-10.52
高锰柱纤方解石	3.94	-13.82
	3.99	-12.13

结合样品埋深及地质背景认为, 研究区混合类页岩经历了高温 ($\delta^{18}\text{O}$ 低) 和较强的水岩作用。泥晶方解石主要形成于早成岩期, 颗粒状方解石主要形成于早成岩末—中成岩早期; 纤状方解石主要形成于中成岩后期, 少量形成于中成岩早期。碳氧同位素数值相关性弱, 表明混合类页岩的成岩系统复杂, 存在多期次、多来源流体的叠加或改造, 且

受有机质成岩作用影响显著。随成岩作用从早期到晚期推进, $\delta^{18}\text{O}$ 值随温度升高呈持续降低趋势。

4.4 方解石 U-Pb 定年揭示的成岩时序

页岩埋藏不同阶段形成的方解石结晶过程会捕获微量铀, 铀以固定半衰期衰变为铅, 通过质谱仪测量样品中铀、放射成因铅及初始铅的同位素比值, 结合衰变公式计算年龄, 以 2 组年龄一致验证体系封闭性, 确定其形成时间 (郭小文等, 2020; 鲁雪松等, 2023), 因此方解石 U-Pb 年龄能精准划分成岩阶段 (如早成岩、中成岩), 厘清各阶段的时间跨度, 还原页岩埋藏演化史, 弥补包裹体测温 and 碳氧同位素数值分布仅能推测大致地质年龄的不足。近年来, 随着激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术的快速发展, 方解石 U-Pb 定年技术为解决页岩成岩演化阶段的精确划分提供了直接的时间约束 (郭小文等, 2020; 鲁雪松等, 2023), 但对研究区页岩中方解石的 U-Pb 年龄分析总体较少。为精准揭示民丰洼陷沙四上亚段页岩中成岩方解石的形成时代及成岩演化阶段, 本次研究针对性采用超低浓度 U-Pb 定年技术对颗粒状方解石、裂缝中充填的颗粒状方解石以及柱纤状方解石进行绝对年龄的测定。

颗粒状方解石呈现单一集中的年龄峰值, 其 U-Pb 定年结果为 35.7 ± 5.4 Ma (图 8-a), 结合民丰洼陷沙四上亚段成岩阶段划分标准 (中成岩 A 期对应埋深 2500~3500 m、温度 80~120 °C、伊蒙混层蒙脱石含量 30%~50%), 该年龄与中成岩 A 期的温压条件、黏土矿物转化阶段及流体活动强度

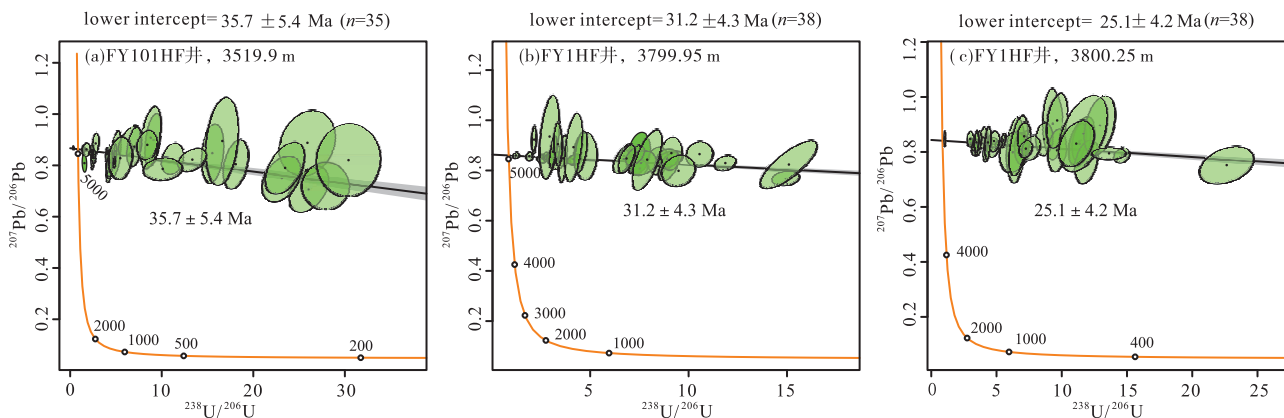


图 8 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩不同类型成岩方解石超低浓度 U-Pb 年龄

Fig. 8 U-Pb ages of super-low concentration of diagenetic calcite in different types of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

高度匹配(图 9), 表明颗粒状方解石是页岩埋深增大、孔隙流体系统趋于稳定、碳酸盐过饱和缓慢累积下的结晶产物, 记录了该阶段相对稳定的成岩环境与流体化学条件。近水平方向柱纤状方解石纹层表现出较宽幅的年龄跨度, 其 U-Pb 年龄介于 $31.2 \pm 4.3 \sim 25.1 \pm 4.2$ Ma 之间(图 8-b, 8-c), 对应早成岩末—中成岩的演化阶段(图 9)。这一年龄分布特征与民丰洼陷的构造流体活动规律密切相关, 不仅清晰揭示了民丰洼陷沙四上亚段近水平柱纤状方解石纹层的多期形成与改造过程, 更间接印证了民丰洼陷古近纪构造—流体活动的阶段性及顺层运移的优势特征, 为深入理解该洼陷沙四上亚段成岩演化与油气成藏的耦合关系提供了关键年代学依据。

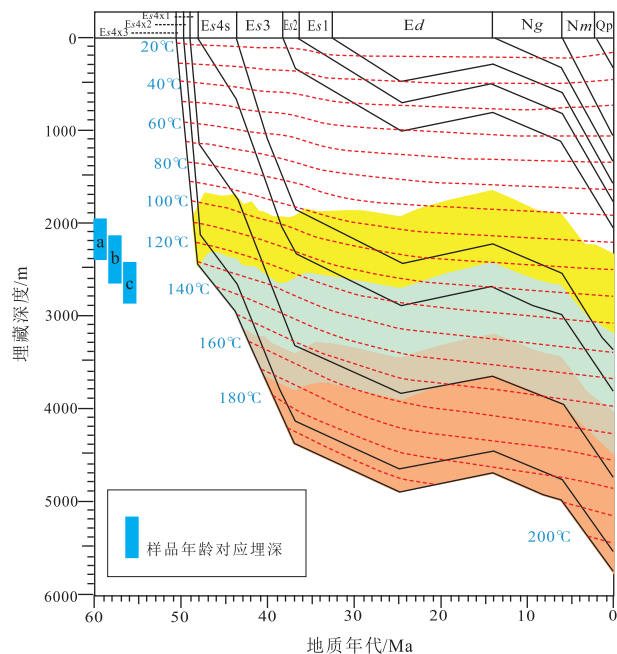


图 9 东营凹陷民丰洼陷方解石 U-Pb 年龄与埋藏史投影图
Fig. 9 Projection diagram of calcite U-Pb age and burial history of Minfeng subsag, Dongying sag

4.5 黏土矿物转化与自生石英生成

石英在改善储集性能和增加脆性等方面有重要意义(赵迪斐等, 2016; 郭佩等, 2023; 梅俊芳等, 2024; 唐晴等, 2025)。民丰洼陷沙四上亚段页岩中的石英主要由颗粒状陆源碎屑石英和微米级自生石英组成, 其中自生石英在泥质纹层和方解石纹层中均发育。选取距离物源相对较远的 FY101HF 井进行岩心 XRF 扫描, 结果显示 SiO_2 与

Al_2O_3 有较好的相关性(图 10), 说明研究区页岩自生石英的硅质来源并非生物硅主导, 而主要是陆源(陈世悦等, 2017)。民丰洼陷陆源碎屑输入主要源自陈家庄凸起的片麻岩和中生界的偏酸性岩浆岩, 原始碎屑输入为中酸性火山岩, 以花岗岩最为常见。

在湖相页岩中, 当伊/蒙混层中蒙皂石层的含量降至约 20% 以下时, 通常被认为进入了中成岩阶段, 蒙皂石层在温度、压力和时间作用下, 通过溶解—沉淀和离子交换, 不可逆地转化为伊利石层, 而民丰洼陷花岗岩母岩风化剥蚀提供丰富钾离子, 促进伊蒙混层向伊利石转化得更加充分, 在转化过程中释放 SiO_2 , 为自生石英的形成提供了重要的“硅源”。需要注意的是, 研究区沙四上亚段页岩伊利石百分含量集中在 70%~90%, 不同沉积构造部位、不同埋深页岩的伊蒙混层和伊利石含量占比存在较明显差异, FY1HF 井页岩(沙四上纯下 1 层组)中伊利石最高含量达 100%(图 11), 自生石英发育更加普遍(图 5)。在富黏土的泥质纹层中, 微晶石英嵌入黏土基质中, 与片状自生伊利石紧密共生, 具有明显的成层现象(图 5), 可见长石边缘和内部溶蚀, 进一步说明泥质纹层内二氧化硅来源主要是蒙脱石向伊利石转化过程中释放和长石溶解释放。在方解石纹层内, 一方面, 富钙流体沉淀, 使方解石包裹自生石英; 另一方面, 方解石溶解释放的 Ca^{2+} 可促进硅质聚集, 自生微晶石英与方解石“共生”形成纹层。总体上黏土矿物转化与自生石英结晶关系密切, 优化了页岩孔隙结构、并提高了孔缝连通性。

5 成岩演化模式及油气地质意义

在成岩矿物分析基础上, 结合元素、同位素、包裹体及 U-Pb 年龄分析, 建立民丰洼陷混合页岩成岩成储模式(图 12)。页岩成岩成储过程随埋深呈现阶段性演化。

早成岩阶段, 地层压实作用显著, 原生孔隙快速减少, 此时以无机矿物演化为核心, 沉积期咸化湖水中 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 浓缩沉淀、藻类光合作用析 CO_2 促沉淀、重力流搬运浅水碳酸盐等来源的泥微晶方解石, 在物理压实作用下胶结成纹层或透镜状; 同时, 洼陷边界断裂活动相对平缓, 以盐湖相

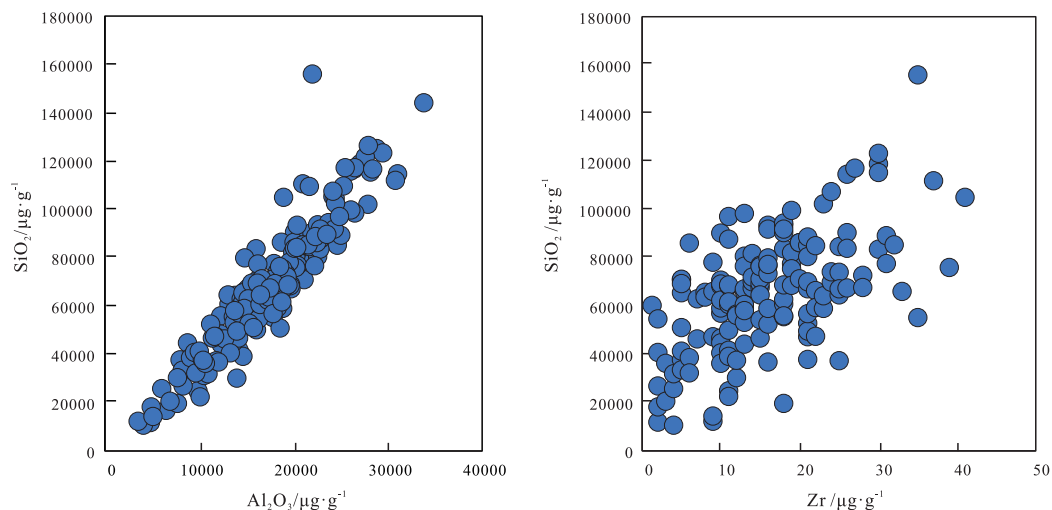


图 10 东营凹陷民丰洼陷 FY101HF 井沙四上亚段页岩元素交汇图

Fig. 10 Elemental intersection diagram of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Well FY101HF in Minfeng subsag, Dongying sag

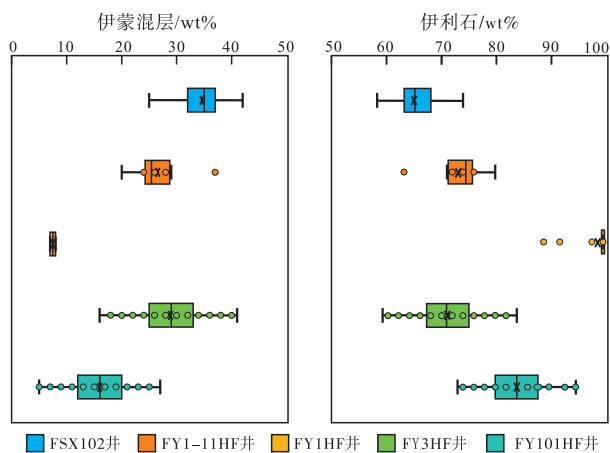


图 11 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩黏土矿物中伊蒙混层、伊利石质量百分含量

Fig. 11 Mass percentage of illite-smectite mixed layer and illite of clay minerals of shale in the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

孔隙水为主的浅层流体顺层缓慢流动,在层理面附近因物理化学条件变化发生碳酸盐沉淀,形成早期柱纤状方解石纹层;沉积期碱性、高盐度湖水高度富集溶解硅在早成岩期腐殖酸诱导作用下沉淀;此外少量蒙脱石脱水转化为伊利石,引发局部层间塌陷并释放硅质,在泥质纹层中形成少量自生石英。孔隙以晶间孔和原生粒间孔为主,孔隙组合较为单一。

进入中成岩早期,黏土矿物持续转化,晶间孔变小但保存完好,孔隙体积和比表面积增加。黏土

转化促使二氧化硅沉淀,形成微晶石英格架,增强岩石刚性并支撑孔隙,大量通过黏土转化生成的自生石英,也是页岩进入生烃窗的可靠矿物学标志。黏土矿物转化过程中释放的镁离子促进方解石的白云石化,其菱面体结构具有强抗压实能力,与方解石重结晶共同构成多样孔隙组合。进入中成岩阶段(22.7±3.6 Ma 左右,对应古近纪渐新世晚期至新近纪早期),伴随有机质生烃和生成有机酸,流体化学性质显著改变(王民等,2019;刘惠民等,2023),对早期形成的方解石纹层进行溶解—再沉淀与叠加改造(张顺等,2022;王伟庆等,2025),最终形成覆盖早成岩—中成岩阶段的宽幅年龄谱(图 12),同时,溶蚀长石、方解石等矿物,形成溶蚀孔,少量会被自生石英充填。有机质生烃与黏土收缩也为中成岩期纤维状方解石生长创造条件,与各类孔隙共同形成页岩油微运移通道。

至中成岩晚期,有机质成熟度进一步提高,在黏土复合体及有机质内部发育少量有机质孔;黏土矿物基本转化为伊利石,含铁孔隙流体促使铁白云石交代早期白云石,有利于宏孔保存。沉积—早成岩期形成的自生石英,被溶蚀作用形成的富钙流体沉淀的方解石“包裹”或挤压聚集(图 5-a, 5-b),而中成岩期由黏土矿物转化形成的自生石英,向方解石晶间迁移沉淀,与重结晶方解石协同维持孔隙空间,缓解了因过度胶结、重结晶对孔隙保存的破坏作用。在生烃增压与石英、碳酸盐等刚性矿

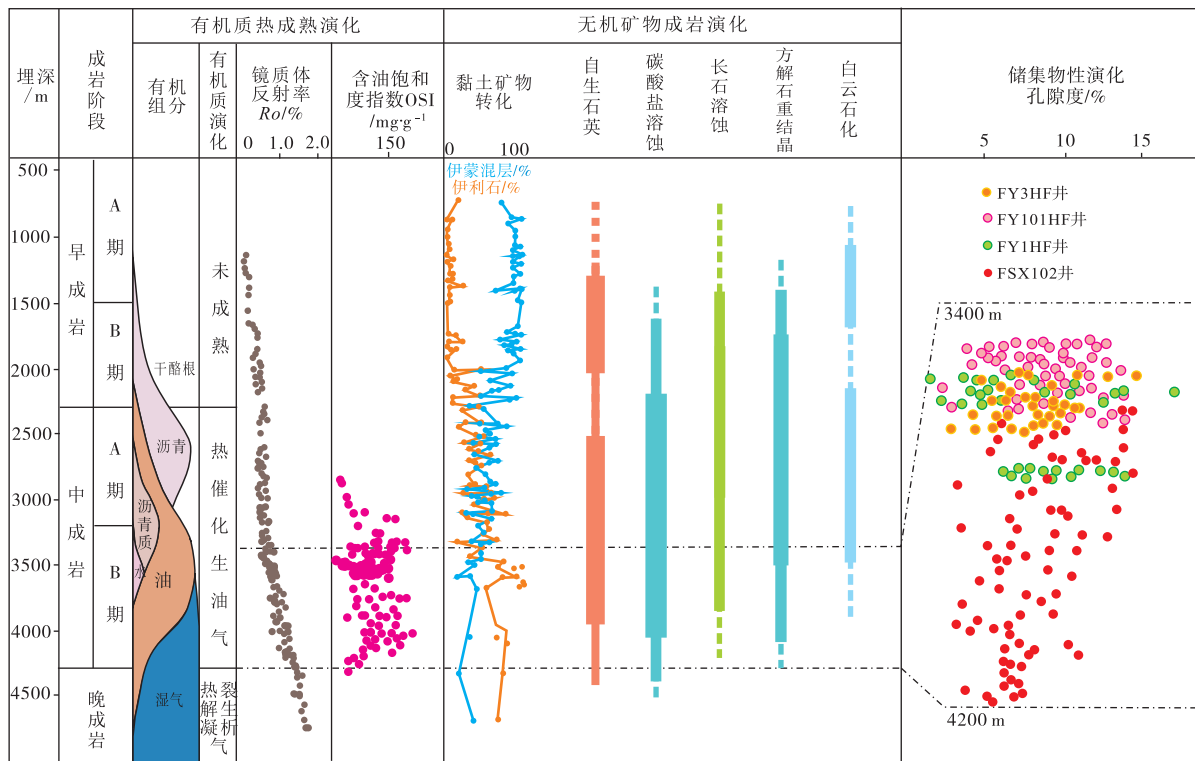


图 12 东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩成岩成储演化模式

Fig. 12 Diagenesis and reservoir evolution model of shale in the upper sub-member 4 of Shahejie Formation in Minfeng subsag, Dongying sag

物骨架的共同支撑下，地层保持较高压力。这一过程揭示了超压与矿物支撑对孔隙保存的关键作用，反映出有机-无机成岩作用的动态耦合及成岩环境的阶段性变迁。

总体上，原始沉积环境控制的咸水环境、多类型细粒沉积物、高沉积速率等为研究区以混合类页岩为主的页岩层系提供了有机质富集和矿物多样混积的先决条件，成岩阶段碳酸盐矿物溶蚀—重结晶、长石溶蚀及自生石英的生成是页岩重要的成岩成储作用，使得沙四上亚段页岩在 3400 m 以深仍具有优越的储集条件。目前，民丰洼陷 FY1HF 井生产 1430 天，累计产油 6.3 万吨；FY1-1HF 井生产 1280 天，累计产油超过 5.7 万吨；超过 10 口井日产油超过 50 吨，展示了民丰洼陷沙四上亚段页岩良好的勘探开发前景。

6 结论

1) 渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷民丰洼陷沙四上亚段页岩沉积期气候整体偏湿润，总体为咸

水、深湖、强还原环境，物源供给能力较强；与东营南部洼陷相比，沉积环境纵向上呈现高频旋回特征，控制了沙四上亚段页岩层系纵向上由碳酸盐页岩与碳酸盐质混合页岩占主导、到三端元矿物均匀混合页岩、再到长英质混合页岩为主的变化特点，高沉积速率、强物源供给、咸水沉积环境对富有机质页岩优质储集层的形成控制作用显著。

2) 民丰洼陷页岩层系经历多期流体活动，原始咸化沉积水影响了早成岩阶段偏碱性流体环境，烃类流体自生成后通过方解石颗粒、脉体或石英支撑的优势通道发生多期次幕式微运移与聚集；颗粒状方解石与纤维状方解石在稀土元素分布、碳氧同位素、U-Pb 年龄等方面显示较明显差异，颗粒状方解石多是早成岩晚期到中成岩早期产物，纤维状方解石具有多期次形成与改造的特点；自生石英普遍发育且 SiO_2 基本来自陆源，早成岩阶段腐殖酸诱导原始沉积水中溶解硅沉淀、中成岩期黏土矿物转化均促进其生成。

3) 原始沉积环境控制的咸水环境、多类型细粒沉积物、高沉积速率等为民丰洼陷混合类页岩提

供了有机质富集和矿物多样堆积重要基础, 方解石重结晶和后期溶蚀作用、自生石英的生成是民丰洼陷沙四上亚段页岩成为优质储集层的重要成岩成储机制, 生烃增压背景下, 石英、碳酸盐矿物等刚性矿物骨架的共同支撑作用是民丰洼陷沙四上亚段页岩优质储集层保孔的主要原因。

参考文献 (References)

- 包友书. 2019. 陆相泥页岩在水平地应力作用下裂缝的多样性: 以济阳坳陷古近系泥页岩为例. 石油学报, 40(7): 777-785. [Bao Y S. 2019. Fracture diversity of continental shale under horizontal geostress: a case study of the Paleogene shale in Jiyang depression. Acta Petrolei Sinica, 40(7): 777-785]
- 陈世悦, 张顺, 刘惠民, 鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报, 19(2): 271-284. [Chen S Y, Zhang S, Liu H M, Yan J H. 2017. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(2): 271-284]
- 池国祥, 卢焕章. 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法. 岩石学报, 24(9): 1945-1953. [Chi G X, Lu H Z. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA) concept. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 1945-1953]
- 郭佩, 柏淑英, 李长志, 雷海艳, 徐文礼, 张锡婷, 文华国. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩自生长英质矿物的成因机理及其储层改造意义. 地质学报, 97(7): 2311-2331. [Guo P, Bai S Y, Li C Z, Lei H Y, Xu W L, Zhang X T, Wen H G. 2023. Formation of authigenic quartz and feldspars in the Fengcheng Formation of the Mahu sag, Junggar basin, and their reservoir modification significance. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2311-2331]
- 郭英海, 赵迪斐, 陈世悦. 2021. 细粒沉积物及其古地理研究进展与展望. 古地理学报, 23(2): 263-283. [Guo Y H, Zhao D F, Chen S Y. 2021. Research progress and prospect of fine-grained sediments and palaeogeography. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(2): 263-283]
- 郭小文, 陈家旭, 袁圣强, 何生, 赵建新. 2020. 含油气盆地激光原位方解石 U-Pb 年龄对油气成藏年代的约束: 以渤海湾盆地东营凹陷为例. 石油学报, 41(3): 284-291. [Guo X W, Chen J X, Yuan S Q, He S, Zhao J X. 2020. Constraint of *in-situ* calcite U-Pb dating by laser ablation on geochronology of hydrocarbon accumulation in petroliferous basins: a case study of Dongying sag in the Bohai Bay Basin. Acta Petrolei Sinica, 41(3): 284-291]
- 黄军平, 杨田, 张艳, 李相博, 董岐石, 杨占龙, Guilherme Bozetti, 郑泽宇. 2023. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式: 以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长 7 油层组露头为例. 沉积学报, 41(4): 1227-1239. [Huang J P, Yang T, Zhang Y, Li X B, Dong Q S, Yang Z L, Bozetti G, Zheng Z Y. 2023. Sedimentary Dynamics and Deposition model of Lacustrine Finegrained Sedimentary Rocks: a case study of the Chang 7 oil member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan area. Acta Sedimentologica Sinica, 41(4): 1227-1239]
- 姜在兴, 张文昭, 梁超, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2014. 页岩油储层基本特征及评价要素. 石油学报, 35(1): 184-196. [Jiang Z X, Zhang W Z, Liang C, Wang Y S, Liu H M, Chen X. 2014. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir. Acta Petrolei Sinica, 35(1): 184-196]
- 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 王鑫, 王勇, 邱贻博, 李政, 王伟庆. 2022. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向. 石油学报, 43(12): 1717-1729. [Liu H M, Li J L, Liu P, Wang X, Wang Y, Qiu Y B, Li Z, Wang W Q. 2022. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression. Acta Petrolei Sinica, 43(12): 1717-1729]
- 刘惠民, 张顺, 王学军, 张鹏飞, 李军亮, 王勇, 魏晓亮, 银燕, 朱德燕. 2023. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例. 地球科学, 48(1): 30-48. [Liu H M, Zhang S, Wang X J, Zhang P F, Li J L, Wang Y, Wei X L, Yin Y, Zhu D Y. 2023. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: a case study from upper sub-member of Es4 in Dongying Sag, Jiyang depression. Earth Science, 48(1): 30-48]
- 鲁雪松, 桂丽黎, 陈玮岩, 柳少波, 吴石头, 范俊佳, 刘强, 孙晶, 张亮亮, 肖阳, 杨文霞, 曹日洲. 2023. 激光原位碳酸盐岩 U-Pb 定年实验方法改进与石油地质应用. 中国科学 (地球科学), 53(12): 2953-2968. [Lu X S, Gui L L, Chen W Y, Liu S B, Wu S T, Fan J J, Liu Q, Sun J, Zhang L L, Xiao Y, Yang W X, Cao R Z. 2023. Improvement of *in situ* LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology. Scientia Sinica (Terra), 53(12): 2953-2968]
- 马存飞, 董春梅, 栾国强, 林承焰, 刘小岑, ELSWORTH Derek. 2016. 泥页岩自然流体压力缝类型、特征及其作用: 以中国东部古近系为例. 石油勘探与开发, 43(4): 580-589. [Ma C F, Dong C M, Luan G Q, Lin C Y, Liu X C, Derek E. 2016. Types, characteristics and effects of natural fluid pressure fractures in shale: a case study of the Paleogene strata in Eastern China. Petroleum Exploration and Development, 43(4): 580-589]
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 胡宗全, 刘惠民, 高波, 王伟庆, 李志明, 张子麟. 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践. 地质学报, 96(1): 155-171. [Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, Hu Z Q, Liu H M, Gao B, Wang W Q, Li Z M, Zhang Z L. 2022. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China. Acta Geologica Sinica, 96(1): 155-171]
- 梅俊芳, 梁超, 操应长, 韩豫. 2024. 页岩中的石英类型、成因及意义. 古地理学报, 26(2): 487-501. [Mei J F, Liang C, Cao Y C, Han Y. 2024. Types, genesis and significance of quartz in shales. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(2): 487-501]
- 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 杨峰, 孙红霞, 冯明石, 刘祖鹏, 吕世超, 王云鹤, 李伟忠, 李忠新. 2025. 济阳坳陷东营凹陷不同岩相页岩储层微观结构定量特征. 油气地质与采收率, 32(4): 1-16. [Ni L

- T, Du Y S, Jiang L, Yang F, Sun H X, Feng M S, Liu Z P, Lü S C, Wang Y H, Li W Z, Li Z X. 2025. Quantitative characteristics of microstructure of shale reservoirs with different lithofacies in Dongying Sag, Jiyang Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 32(4): 1-16]
- 邱贻博, 贾光华, 刘晓峰, 刘鑫金, 孙锡年, 孙红蕾. 2020. 东营凹陷古近系构造转换及其对盆地控制作用. *中国石油勘探*, 25(6): 50-57. [Qiu Y B, Jia G H, Liu X F, Liu X J, Sun X N, Sun H L. 2020. Structural transformation in Paleogene and its controlling effect in Dongying sag. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 50-57]
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 樊太亮, 高志前, 王宏语. 2023. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用. *地学前缘*, 30(4): 142-151. [Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, Fan T L, Gao Z Q, Wang H Y. 2023. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 142-151]
- 谭先鋒, 田景春, 李祖兵, 张守鹏, 王伟庆. 2010. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化: 以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例. *地质通报*, 29(4): 535-543. [Tan X F, Tian J C, Li Z B, Zhang S P, Wang W Q. 2010. Diagenetic process of fragmental reservoir in alkali sediment environment-taking the Member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying sag, Shandong, China for example. *Geological Bulletin of China*, 29(4): 535-543]
- 唐晴, 梁超, 吴靖, 籍士超, 谢浩然, 赵梓龙. 2025. 基于有机质孔特征的页岩储集层评价研究: 以川南地区五峰组—龙马溪组为例. *古地理学报*, 27(5): 1137-1156. [Tang Q, Liang C, Wu J, Ji S C, Xie H R, Zhao Z L. 2025. Evaluation of shale reservoirs based on organic pore characteristics: a case study of the Wufeng and Longmaxi Formations in southern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 27(5): 1137-1156]
- 滕建彬. 2024. 沉积和成岩作用交互约束页岩油生储品质机理分析: 以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙河街组页岩为例. *油气地质与采收率*, 31(6): 18-32. [Teng J B. 2024. Mechanism of interaction influence between sedimentation and diagenesis on quality of shale oil generation and storage: a case study of Paleogene shale of Shahejie Formation in Niuzhuang Subsag of Dongying Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(6): 18-32]
- 滕建彬, 邱隆伟, 张守鹏, 马存飞. 2022. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相富有机质页岩白云石成因及成岩演化. *石油勘探与开发*, 49(6): 1080-1093. [Teng J B, Qiu L W, Zhang S P, Ma C F. 2022. Origin and diagenetic evolution of Dolomites in Paleogene Shahejie Formation lacustrine organic shale of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1080-1093]
- 王必金, 鲜本忠, 彭伟, 赵琳, 陈绵琨, 余志云, 舒逸, 石浩程, 帅钰洁, 刘乙辰. 2025. 天文旋回约束下的页岩岩相分布与有机质富集: 以四川盆地复兴地区东岳庙段为例. *沉积学报*, 43(4): 1475-1488. [Wang B J, Xian B Z, Peng W, Zhao L, Chen M K, Yu Z Y, Shu Y, Shi H C, Shuai Y J, Liu Y C. 2025. Lithofacies distribution and organic matter enrichment of shale under the constraint of astronomical cycles: a case study of the Dongyuemiaomember in the Fuxing area, Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(4): 1475-1488]
- 王民, 马睿, 李进步, 卢双舫, 李传明, 郭志强, 李政. 2019. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理. *石油勘探与开发*, 46(4): 789-802. [Wang M, Ma R, Li J B, Lu S F, Li C M, Guo Z Q, Li Z. 2019. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(4): 789-802]
- 王伟庆, 王学军, 李政, 王玉环, 朱丽鹏, 李朋波. 2025. 东营凹陷低成熟页岩储集空间与分形特征: 以民丰洼陷沙四段上亚段页岩为例. *油气地质与采收率*, 32(2): 14-24. [Wang W Q, Wang X J, Li Z, Wang Y H, Zhu L P, Li P B. 2025. Reservoir space and fractal characteristics of low-maturity shale in Dongying Sag: a case study of Upper Submember of Fourth Member in Eocene Shahejie Formation in Minfeng area. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 32(2): 14-24]
- 王鑫, 刘惠民, 张顺, 李政, 杜振京, 黎萍. 2023. 济阳坳陷博兴洼陷页岩油微运移特征. *地质论评*, 69(S1): 270-272. [Wang X, Liu H M, Zhang S, Li Z, Du Z J, Li P. 2023. Micro-migration characteristics of shale oil in Boxing Subsag of Jiyang Depression. *Geological Review*, 69(S1): 270-272]
- 王勇. 2024. 济阳坳陷古近系沙三下一沙四上亚段咸化湖盆证据及页岩油气地质意义. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 48(3): 27-36. [Wang Y. 2024. Evidence of Paleogene saline lake basin in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation in Jiyang Depression and geological significance of shale oil and gas. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 48(3): 27-36]
- 杨万芹. 2018. 东营凹陷沙三下一沙四上亚段页岩岩相特征及发育规律. *中国石油大学(华东)博士学位论文*. [Yang W Q. 2018. Shale Lithofacies Characteristics and Development Rule of the Lower Es3 and Upper Es4, Dongying Sag. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(East China)]
- 杨勇, 张世明, 吕琦, 杜玉山, 李伟忠, 程紫燕, 吕晶, 刘祖鹏. 2024. 中国东部陆相断陷盆地中—低成熟度页岩油立体开发技术: 以济阳坳陷古近系沙河街组为例. *石油学报*, 45(4): 672-682, 697. [Yang Y, Zhang S M, Lü Q, Du Y S, Li W Z, Cheng Z Y, Lü J, Liu Z P. 2024. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in Eastern China: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression. *Acta Petrolei Sinica*, 45(4): 672-682, 697]
- 张奎华, 王越, 于洪洲, 周健, 汪誉新, 宋梅远, 倪胜利. 2024. 中国东西部陆相页岩油地质特征差异性分析及其对富集规律影响: 以胜利探区为例. *油气地质与采收率*, 31(4): 42-59. [Zhang K H, Wang Y, Yu H Z, Zhou J, Wang Y X, Song M Y, Ni S L. 2024. Difference analysis of geological characteristics of continental shale oil in eastern and western China and its influence on enrichment

- law: a case study of exploration area of Shengli Oilfield. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(4): 42–59]
- 张瑞, 金之钧, 朱如凯, 李明松, 惠潇, 魏韧, 贺翔武, 张谦. 2023. 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义. *石油与天然气地质*, 44(4): 829–845. [Zhang R, Jin Z J, Zhu R K, Li M S, Hui X, Wei R, He X W, Zhang Q. 2023. Investigation of deposition rate of terrestrial organic-rich shales in China and its implications for shale oil exploration. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 829–845]
- 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]
- 张顺, 刘惠民, 陈世悦, 王永诗, 蒲秀刚, 张奎华, 韩文中. 2017. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨: 以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例. *地质学报*, 91(5): 1108–1119. [Zhang S, Liu H M, Chen S Y, Wang Y S, Pu X G, Zhang K H, Han W Z. 2017. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of Eastern China: insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1108–1119]
- 张顺, 刘惠民, 张鹏飞, 李军亮, 刘鑫金, 宋晓倩, 魏晓亮, 王勇, 王伟庆. 2022. 东营凹陷中低成熟度富碳酸盐页岩地质特征: 以牛庄洼陷沙四段上亚段为例. *中国矿业大学学报*, 51(6): 1138–1151. [Zhang S, Liu H M, Zhang P F, Li J L, Liu X J, Song X Q, Wei X L, Wang Y, Wang W Q. 2022. Geological characteristics of shale oil enrichment in Niuzhuang sag, Dongying depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(6): 1138–1151]
- 赵迪斐, 郭英海, 杨玉娟, 王守玉, 毛潇潇, 李咪. 2016. 渝东南下志留统龙马溪组页岩储集层成岩作用及其对孔隙发育的影响. *古地理学报*, 18(5): 843–856. [Zhao D F, Guo Y H, Yang Y J, Wang S Y, Mao X X, Li M. 2016. Shale reservoir diagenesis and its impacts on pores of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southeastern Chongqing. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(5): 843–856]
- 周瑶琪, 周振柱, 陈勇, 路言秋, 周红建, 明玉广. 2011. 东营凹陷民丰地区深部储层成岩环境变化研究. *地学前缘*, 18(2): 268–276. [Zhou Y Q, Zhou Z Z, Chen Y, Lu Y Q, Zhou H J, Ming Y G. 2011. Research on diagenetic environmental changes of deep reservoir in Minfeng Area, Dongying Sag. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 268–276]
- Gingerich P D. 2021. Rates of geological processes. *Earth-Science Reviews*, 220: 103723.
- Liu H M, Zhang S, Song G Q, Zhang S P, Hao X F, Xie Z H, Xu N N, Liu P. 2017. A discussion on the origin of shale reservoir inter-laminar fractures in the Shahejie Formation of Paleogene, Dongying depression. *Journal of Earth Science*, 28: 1064–1077.
- Miao Z W, Zhang K H, Zhang P F, Liu H M, Zhang Q, Yu J J. 2024. The staged growth of bedding-parallel fibrous calcite veins, from synsedimentary period to oil-generative window. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106660.
- Tyson R V. 2001. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modelling study. *Organic Geochemistry*, 32: 333–339.
- Zhang J G, Jiang Z X, Liang C, Baars T F, Wang Y W, Abels H A. 2022. Astronomical forcing of meter-scale organic-rich mudstone-limestone cyclicity in the Eocene Dongying sag, China: implications for shale reservoir exploration. *AAPG Bulletin*, 106: 1557–1579.

(责任编辑 李新坡)