

深层-超深层致密砂岩储层非均质性成因

——以四川盆地西部须家河组二段为例

杨田^{1,2}, 崔蓉¹, 侯明才^{1,2}, 朱宏权³, 文晓涛¹, 田景春¹, 李政¹, 刘飞扬¹, 蔡来星¹

[1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 自然资源部深时古地理重建与应用重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041]

摘要:为了明确深层-超深层碎屑岩储层非均质性及其成因,以四川盆地西部须家河组二段典型储层为例,综合运用物性测试、岩石学分析及成岩-裂缝表征等手段,系统研究了川西坳陷须二段的储层特征、非均质性表现形式及其成因。研究表明:①川西须二段深层-超深层储层平均孔隙度为3.5%,平均渗透率为 $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型致密储层;成岩作用复杂,表现为强压实、强胶结、弱溶蚀;多尺度裂缝广泛发育,多期破裂与充填交互;整体非均质性极强。②储层物性非均质性是其非均质性的具体表现形式,沉积非均质性包括物质组成和沉积构造的非均质性两方面;沉积构型与岩相组合控制不同尺度成岩物质迁移与沉淀过程,导致成岩作用类型与强弱具有显著差异;小尺度裂缝发育与局部应力、沉积构型界面和岩相组合类型之间关系密切。③沉积环境与沉积过程、成岩环境与物质迁移、应力环境与破裂响应的多变性是控制深层-超深层储层不同形式与不同尺度非均质性的主要原因。④深入开展沉积过程的精细解析、成岩演化过程的恢复和破裂响应的定量约束等工作,是破解深层-超深层储层非均质性的主要路径。

关键词:非均质性;成因机制;碎屑岩储层;深层-超深层;须(须家河组)二段;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Origins of heterogeneity in deep to ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study the 2nd member of Xujiahe Formation, western Sichuan Basin

YANG Tian^{1,2}, CUI Rong¹, HOU Mingcai^{1,2}, ZHU Hongquan³, WEN Xiaotao¹,
TIAN Jingchun¹, LI Zheng¹, LIU Feiyang¹, Cai Laixiang¹

[1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Exploration & Production Research Institute, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: To elucidate the heterogeneity and its origins in deep to ultra-deep clastic reservoirs, typical reservoirs of the 2nd member of the Xujiahe Formation (Xu 2 Member) in the western Sichuan Basin were selected as a case study. Integrated petrophysical testing, petrographic analyses, and diagenetic-fracture characterization were employed to systematically investigate the reservoir characteristics, heterogeneity patterns, and genetic features of Xu 2 Member in the western Sichuan Depression. As indicated by the research results, (1) the deep to ultra-deep reservoirs of Xu 2 Member exhibit an average porosity of 3.5% and an average permeability of $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, representing typical tight reservoirs. Diagenetic processes are complex and characterized by intense compaction, strong cementation, and weak dissolution. Multi-scale fractures are widely developed, with multi-stage fracturing and mineral infilling, resulting in extremely strong reservoir heterogeneity. (2) Reservoir heterogeneity is primarily manifested in physical-property variations. Sedimentary heterogeneity includes two aspects: material composition and sedimentary structure.

收稿日期:2026-01-06;修回日期:2026-05-18。

第一作者简介:杨田(1989—),男,研究员、博士研究生导师,沉积学和油气储层地质学。E-mail: yangtian19@cdut.edu.cn。

通信作者简介:侯明才(1968—)男,教授、博士研究生导师,大地构造沉积学和层序岩相古地理学。E-mail: houmc@cdut.edu.cn。

基金项目:国家油气重大专项(2025ZD1400405-01);四川省杰出青年科学基金(2025NSFJQ0004);四川省科技教育联合基金面上项目(2024NSFSC1993)。

Sedimentary architecture and lithofacies associations control the migration and precipitation of diagenetic materials at different scales, leading to significant variations in diagenetic type and intensity. The development of small-scale fractures is closely related to local stress magnitudes, sedimentary architecture interfaces, and lithofacies association types. (3) The variability of sedimentary environments and depositional processes, diagenetic environments and material migration, and stress regimes and fracture responses constitutes the key controlling factors underlying the origins of heterogeneity at different forms and scales in deep to ultra-deep reservoirs. (4) Detailed characterization of depositional processes, reconstruction of diagenetic evolution, and quantitative constraint of fracture responses are considered the main approaches for understanding the heterogeneity of deep to ultra-deep reservoirs.

Key words: heterogeneity, origin, clastic reservoir, deep to ultra-deep reservoir, Xu 2 Member, Sichuan Basin

引用格式: 杨田, 崔蓉, 侯明才等. 深层-超深层致密砂岩储层非均质性成因——以四川盆地西部须家河组二段为例[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10.11743/oggXXXXX01.

YANG Tian, CUI Rong, HOU Mingcai, et al. Origins of heterogeneity in deep to ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study the 2nd member of Xujiahe Formation, western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10.11743/oggXXXXX01.

随着中层和浅层油气藏勘探开发程度的不断提升, 深层油气资源成为现阶段和未来中国油气勘探开发的主战场^[1-5]。深层油气藏具有高温、高压、高应力状态和强非均质性的典型特征^[1-2], 深刻认识含油气盆地深层-超深层油气地质的规律和地质特点, 解决深层-超深层勘探开发的科学技术问题, 是今后勘探开发的重要方向^[1,6-9]。在全油气系统理论视角下, 深层-超深层油气形成的核心关键是优质储层的发育机制^[1-2,7-11]。以碎屑岩储层为例, 随着埋藏深度的不断增加, 储层大孔不断衰减, 而与裂缝有关的储集结构类型逐渐增多, 储层的非均质性不断增强^[10-15]。受沉积、成岩和构造作用等多因素综合控制, 碎屑岩储层均质是相对的、储层非均质是绝对的^[16-17]; 作为储层的固有属性, 储层非均质性在中浅层被视为储层发育不利因素, 在深层超深层背景下则成为优质储层发育的重要保障。深层碎屑岩储层非均质性具有多类型、多层次和多关联的典型特征, 深入分析深层碎屑岩储层特征与非均质性成因是明确优质储层形成机制的必然要求^[16-18]。

碎屑储层非均质性的研究早期主要以平均值化的反映储层非均质性程度的参数来表征^[19], 如突进系数和变异系数等。深层-超深层碎屑岩储层非均质性与中浅层碎屑岩储层之间存在显著的差异, 主要表现在深层-超深层碎屑岩储层成岩改造更强烈、裂缝更发育、流体分布更复杂, 即深层-超深层碎屑岩储层非均质性更强^[15-17,20-21]。罗晓容^[16,22]进一步强调, 深层-超深层碎屑岩储层非均质性受沉积构型和沉积构造控制显著, 具有显著的结构性特征, 提出了结构非均质性的概念和研究思路, 以更好表征深层-超深层碎屑岩储层非均质性的层次性与结构性。因此, 物质组成与沉积过程是决定深层-超深层碎屑岩储层非均质性的起

点, 也是连接不同层次和类型非均质性的桥梁。近年来, 关于碎屑岩沉积过程的研究有了新的发展。例如, 认识到在不同的沉积环境中超临界流沉积广泛发育, 是控制碎屑岩不同尺度沉积构型与沉积构造的重要动力机制^[23-24]。因而, 重新审视沉积过程控制下的不同层次和类型的深层-超深层碎屑岩储层非均质性特征及其成因联系, 是破解深层-超深层碎屑岩优质储层成因, 进而指导深层-超深层碎屑岩油气藏高效勘探开发的关键。

按照西部盆地深层和超深层的定义, 将地质历史时期地层最大埋深超过 4 500 m 和 6 000 m 分别作为深层和超深层储层的划分标准^[25]。四川盆地三叠系须家河组是中国深层-超深层致密碎屑岩的典型代表和致密气规模勘探发现的起始地^[26], 也是深层-超深层致密碎屑岩储层油气地质研究的创新策源地^[27-28]。特别是四川盆地西部须(须家河组)二段现今埋深超过 4 500 m, 地质历史时期的最大埋深可达 6 000 ~ 7 000 m^[29], 储层整体致密、孔喉结构复杂、天然裂缝广泛发育、储层非均质性极强^[30]。因此, 深入开展须二段不同层次和类型的储层非均质性特征及其成因研究, 是解决须家河组长期以来“有资源、低储量、无产量”被动局面的关键。本文以四川盆地西部须二段储层为例, 针对深层-超深层致密碎屑岩储层的典型特征、非均质性表现形式、非均质性成因及其评价开展系统论述, 为深层-超深层致密碎屑岩优质储层预测与规模勘探和效益开发提供理论指导。

1 区域地质背景

四川盆地西部坳陷(以下简称川西坳陷)位于龙门

山前缘中部地带,面积超 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有“西高东低”的地势特点^[31-32]。川西坳陷依据龙门山展布可划分为南段、中段和北段3段。研究区位于川西坳陷中段,可划分为新场构造带、龙门山前构造带、成都凹陷、中江斜坡、梓潼凹陷和龙泉山构造带,具有“三隆两凹一坡”的构造格局^[30](图1a)。

川西坳陷陆相层系自下而上包括中三叠统须家河组(T_3x),侏罗系白田坝组(J_1b)、千佛崖组(J_2q)、沙溪庙组(J_2s)、遂宁组(J_3sn)、蓬莱镇组(J_3p)和下白垩统剑门关组(K_1j)^[31-35]。其中,上三叠统须家河组主要为一套黄灰色和灰白色含砾岩、砂岩、粉砂岩和黑色泥岩夹煤层组合的沉积地层,总体分为5段,为三角洲-湖泊沉积体系。

研究区须二段处于海陆过渡相,主要储集层为辫状河三角洲前缘沉积,普遍发育在高能的水下分流河道及河口坝中。须二段沉积厚度介于560~660 m,以大套中、细砂岩为主,发育部分粉砂和粗砂,厚层砂岩间夹薄层泥岩和页岩。该段发育上亚段、中亚段和下亚段3个亚段,并可进一步划分为10个砂组,其中,中亚段含气性最佳(图1b)^[35]。须二段天然气主要来自

下伏小塘子组和须二上亚段和中亚段之间的“腰带子”烃源岩,小塘子组烃源岩厚度介于60~80 m,须二段“腰带子”烃源岩厚度介于10~20 m^[35]。储层整体致密,以次生孔隙为主,局部发育一定量原生孔隙。

2 深层-超深层致密砂岩储层典型特征

2.1 储层整体致密

通过统计1 434个孔隙度和渗透率物性数据点,发现川西坳陷须二段储层致密,孔隙度介于0.31%~12.97%,平均值约为3.50%,集中分布范围为1.00%~6.00%;渗透率介于 $(0.002 \sim 113.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,集中分布范围为 $(0.002 \sim 0.500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2a),部分高渗透率储层物性主要受储层裂缝发育控制。储层渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度普遍小于10.00%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且孔隙度小于10.00%的样品数据点占比为93.74%,属于典型致密储层。

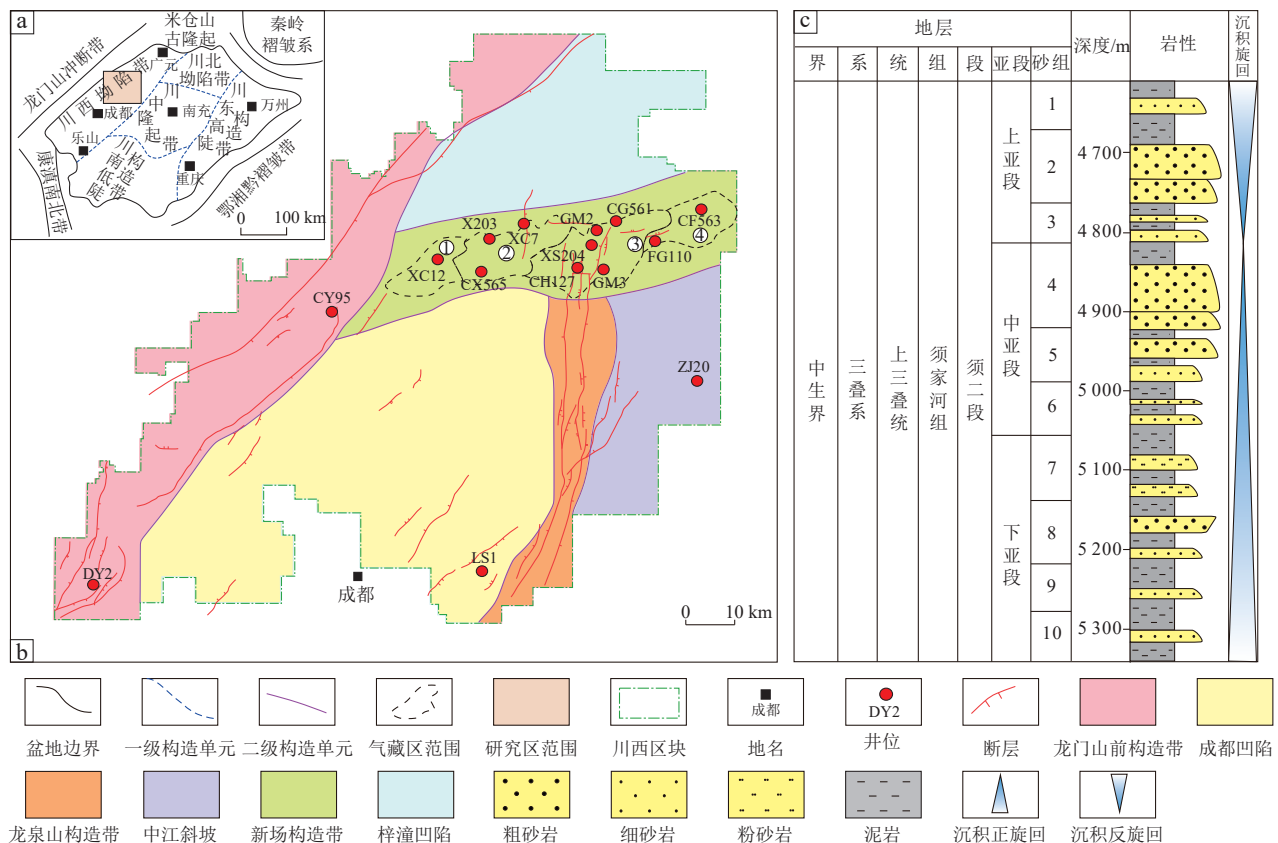


图1 四川盆地川西坳陷构造位置、构造单元划分及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location, tectonic-unit division, and composite stratigraphic column of the western Sichuan Depression in the Sichuan Basin

a. 四川盆地川西坳陷构造位置; b. 川西坳陷构造单元划分及重点井位分布; c. 须家河组二段综合柱状图

(b图中①—④分别表示孝泉地区、新场地区、合新场地区和丰谷地区。)

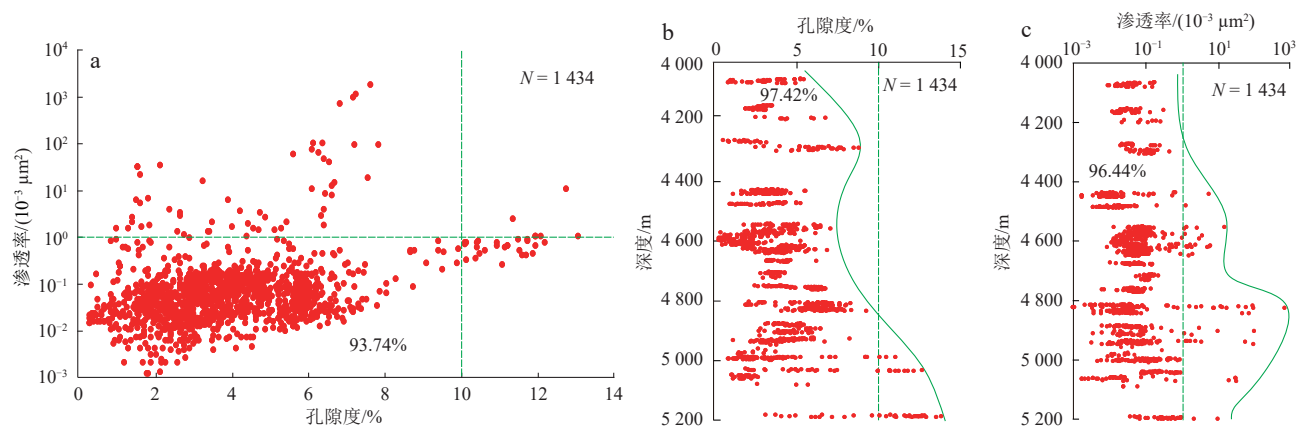


图2 四川盆地川西坳陷须二段储层物性

Fig. 2 Reservoir physical properties of the 2nd member of the Xujiahe Formation (Xu 2 Member) in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 孔隙度与渗透率交汇图; b. 孔隙度与深度交汇图; c. 渗透率与深度交汇图

(图中红色散点表示须二段储层物性分布, 绿色虚线表示致密储层物性标准线, 绿色曲线表示包络线。)

2.2 成岩作用复杂

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层经历了漫长的埋藏演化过程, 成岩作用复杂(图3)。整体表现为压实作用和压溶作用强, 胶结作用类型多、期次多、强度大, 溶蚀作用表现形式复杂。碎屑颗粒整体以线-凹凸接触为主(图3a), 塑性颗粒假杂基化严重, 石英颗粒集中发育区可见压溶形成的石英次生加大广泛发育(图3a), 整体指示压实作用较强。胶结作用包括碳酸盐胶结、硅质胶结和黏土矿物胶结等多种类型(图3b—e)。

碳酸盐胶结可见方解石、铁方解石、铁白云石和菱铁矿等多种胶结物类型, 以方解石和铁方解石广泛发育为典型特征。上述胶结物大量充填原生孔隙和裂缝, 阴极发光颜色不同指示不同铁含量的多期方解石逐渐生长沉淀并最终完全充填孔隙空间的过程(图3b)。

硅质胶结可见石英次生加大、孔隙充填和裂缝充填等多种形式(图3c), 部分硅质胶结物与压溶作用和溶蚀作用存在岩相学上的伴生关系, 整体指示了复杂的硅质流体来源和期次及对储层的强烈改造作用。

黏土矿物以伊利石和绿泥石最为常见。绿泥石可见双层结构或孔隙充填结构。双层结构的绿泥石以晶形不明显、紧密堆积的内层环边和呈玫瑰花瓣状、松散堆积的外层孔隙衬垫为典型特征(图3d)。伊利石以丝发状为典型特征, 可见片状高岭石向丝发状伊利石转化的现象(图3e), 这一方面指示了成岩演化程度高, 另一方面可增加部分晶间孔隙^[36]。

溶蚀作用以长石和岩屑的溶蚀为主, 可见长石溶蚀与副产物共生, 也可见孤立的粒内溶蚀孔隙发育

(图3f), 部分早期溶蚀孔隙在后期强烈的压实作用下可发生坍塌。

2.3 裂缝广泛发育

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层不同尺度的裂缝广泛发育, 表现为多期破裂充填作用交互的特征, 特别是薄片尺度的微裂缝对增加储层的储集空间和改善渗透性起到重要作用^[20](图3g—j)。薄片尺度的微裂缝根据其充填状态可进一步细分为全充填微裂缝(图3g—j)、半充填微裂缝(图3g—j)和未充填微裂缝(图3g—j)。

全充填微裂缝可细分为单期矿物充填与多期矿物充填类型, 以多期充填微裂缝最为常见(图3g, h)。可见早期细晶硅质充填于微裂缝边缘, 向内部发育中-粗晶硅质晶体发育, 部分区域形成石英晶体的指状交叉支撑, 微裂缝内部剩余的储集空间最终被晚期的方解石完全充填。半充填微裂缝以石英晶体半充填最为发育, 石英晶体的生长使得微裂缝呈现断续半充填的特征(图3i)。未充填微裂缝内部无明显矿物充填, 指示其形成时间相对较晚, 能够显著增加储层的孔隙度和渗透率。

3 深层-超深层致密砂岩储层非均质性表现

在川西坳陷须二段致密碎屑岩储层整体特征分析的基础上, 进一步对深层-超深层致密碎屑岩储层非均质性表现形式进行总结, 主要包括物性、物质组成、

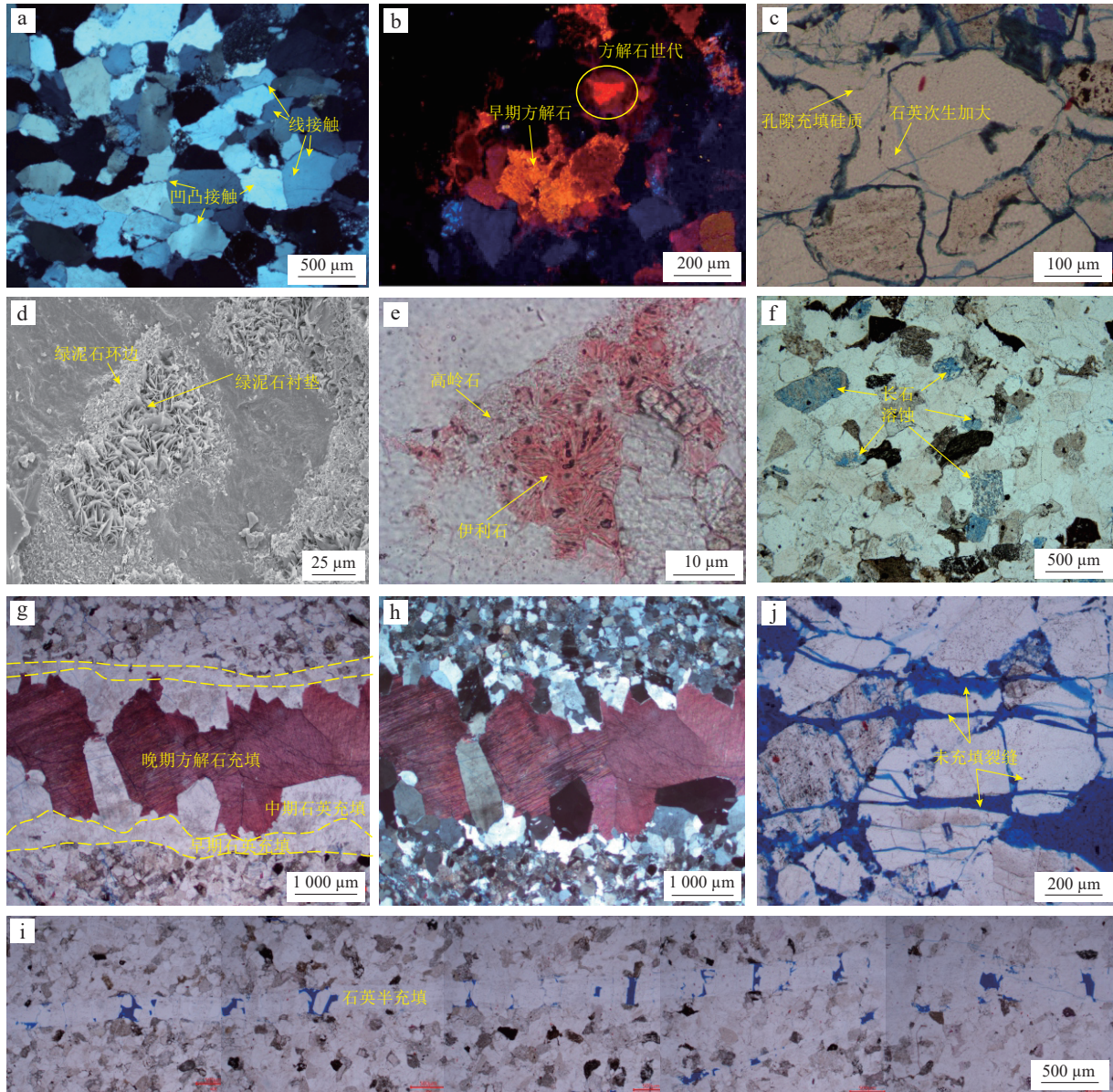


图3 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层成岩作用与微裂缝特征

Fig. 3 Diagenetic and microfracture characteristics of tight clastic reservoirs in the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 川孝565井,埋深4 898.71 m,压实作用强,颗粒线接触与凹凸接触为主,铸体薄片,正交偏光;b. 中江20井,埋深4 166.60 m,多期方解石发育,早期方解石阴极发光为亮橘色,晚期方解石为暗红色,普通薄片,阴极发光;c. 新场7井,埋深5 187.90 m,石英次生加大与孔隙充填状硅质胶结,铸体薄片,单偏光;d. 高庙3井,埋深5 084.67 m,绿泥石胶结发育,具有颗粒环边与孔隙衬垫的双层结构,扫描电镜;e. 川孝565井,埋深4 898.50 m,高岭石充填原生孔隙,部分的高岭石转化为伊利石,铸体薄片,单偏光;f. 川孝565井,埋深5 058.45 m,长石溶蚀形成蜂窝状的溶蚀孔隙,铸体薄片,单偏光;g. 川孝565井,埋深5 050.77 m,裂缝多期胶结物充填,早期石英晶粒微小,中期石英晶粒大,晚期方解石完全充填,铸体薄片,单偏光;h. 川孝565井,埋深5 050.77 m,裂缝多期胶结物充填,早期石英晶粒微小,中期石英晶粒大,晚期方解石完全充填,铸体薄片,正交偏光;i. 川孝565井,埋深4 898.79 m,微裂缝发育,石英晶粒半充填,铸体薄片,单偏光;j. 川孝565井,埋深5 052.93 m,微裂缝发育,切穿碎屑颗粒,未充填,铸体薄片,单偏光

成岩作用和破裂作用等4个方面。

3.1 物性非均质性

物性非均质性是深层-超深层致密碎屑岩储层非均质的主要表现形式之一。以川西坳陷须二段致密碎屑岩储层为例,除了部分受裂缝控制的低孔高渗数据

点之外,储层整体孔隙度与渗透率的相关关系较好。在整体致密背景下,依然发育部分孔隙度和渗透率相对较高的优质储层(图2a)。孔隙度和渗透率与地层埋深的关系表明,储层物性随埋深增加而逐渐减小,但在该背景下局部仍存在异常高值,指示了深层-超深层致密碎屑岩储层具有强烈的物性非均质性(图2b)。

从储层储集空间发育特征来看,在整体强压实致密背景下,局部发育有较多次生孔缝(图3c,f,j)。

3.2 沉积非均质性

深层-超深层致密碎屑岩储层的物性非均质性是其非均质性的具体表现形式,而物质组成的差异性则是形成这一非均质性的内在关键。储层的沉积非均质性包括物质组成的非均质性和沉积构造的非均质性两个方面。物质组成的非均质性又包含岩石组成的差异性和岩心尺度物质组成的差异性。

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层的岩石组成在不同地区及不同层位存在显著差异(图4)。孝泉和丰谷地区以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,新场地区和合兴场地区则以石英砂岩类岩石发育为典型特征(图4a)。在须二段1—4砂组中,发育石英砂岩类和岩屑砂岩类等多种岩石类型,而须二段5砂组则以石英砂岩类岩石为主(图4b)。岩心尺度的物质组成差异主要体现在砂岩与泥岩的混合程度(图5a)。在整体以辫状河三角洲前缘沉积为主的沉积背景下,存在大量砂岩沉积中泥砾广泛发育的层段,形成泥质碎屑发育砂岩段与块状砂岩段在垂向上频繁叠置的物质组成差异表现形式(图5a)。

沉积构造的非均质性主要体现在沉积构造类型及其垂向组合样式的多样性(图5b)。研究区储层中广泛发育槽状交错层理、平行层理、块状沉积和沙纹层理等多种沉积构造。在垂向上,可形成块状砂岩与平行层理砂岩互层叠置(图5b)、块状砂岩与槽状交错层理互层叠置,以及平行层理发育砂岩与槽状交错层理砂岩垂向叠置等多种岩相组合样式,从而使整体非均质性特征进一步复杂化。

3.3 成岩非均质性

沉积非均质性进一步控制储层的差异性成岩改造,形成不同层次和类型的成岩非均质性。在砂组尺度上,物质组成差异会导致成岩作用类型的整体差异;在沉积微相尺度上,不同沉积动力环境会导致成岩作用类型的局部差异;在沉积构型与岩相组合尺度上,成岩物质迁移与沉淀过程的差异导致成岩作用类型与强弱的微观差异。

须二段1—3砂组物质组成中碳酸盐岩岩屑含量明显高于4—5砂组(图5c),导致1—3砂组的碳酸盐胶结物发育程度明显高于4—5砂组储层。须二段4—5砂组石英砂岩类储层更为发育,其不同沉积微相类型成岩作用特征之间一定差异,特别是河道与河口坝复合沉积砂体中可见绿泥石包壳大量发育。绿泥石包壳的发育可在一定程度上抑制压实作用,导致储层原生孔隙发育(图5d)。在相同的沉积微相内部,沉积构型级次与岩相组合类型进一步控制成岩作用的差异。例如,在厚层叠置型砂体内部发育的三级构型界面,由于冲刷作用导致局部沉积物粒度较粗,流体活动强烈,易产生碳酸盐强胶结,导致储层物性降低,非均质性增强(图6)。

3.4 破裂非均质性

深层-超深层致密碎屑岩储层中的破裂作用同样具有极强的非均质性,主要表现在不同尺度破裂效应的差异分布。相对大尺度裂缝的发育主要受控于断层距离:距离断层越近,大尺度裂缝相对越发育^[20]。在距离断层相近的位置,小尺度裂缝的发育则与局部应

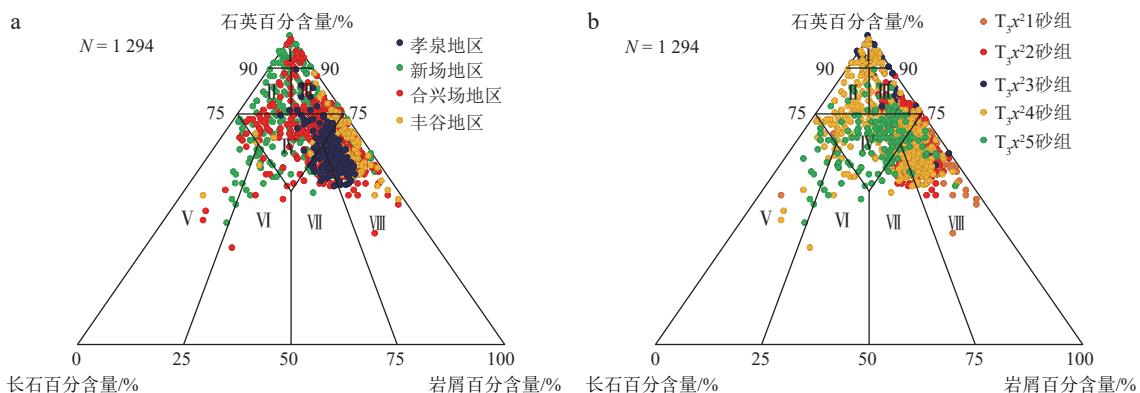


图4 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层岩石学特征

Fig. 4 Petrographic characteristics of tight clastic reservoirs in the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 不同地区岩石成分三角图; b. 不同层位岩石成分三角图

I. 石英砂岩; II. 长石英砂岩; III. 岩屑石英砂岩; IV. 长石岩屑石英砂岩; V. 长石砂岩; VI. 岩屑长石砂岩; VII. 长石岩屑砂岩; VIII. 岩屑砂岩;
T₃x². 中三叠统须家河组二段

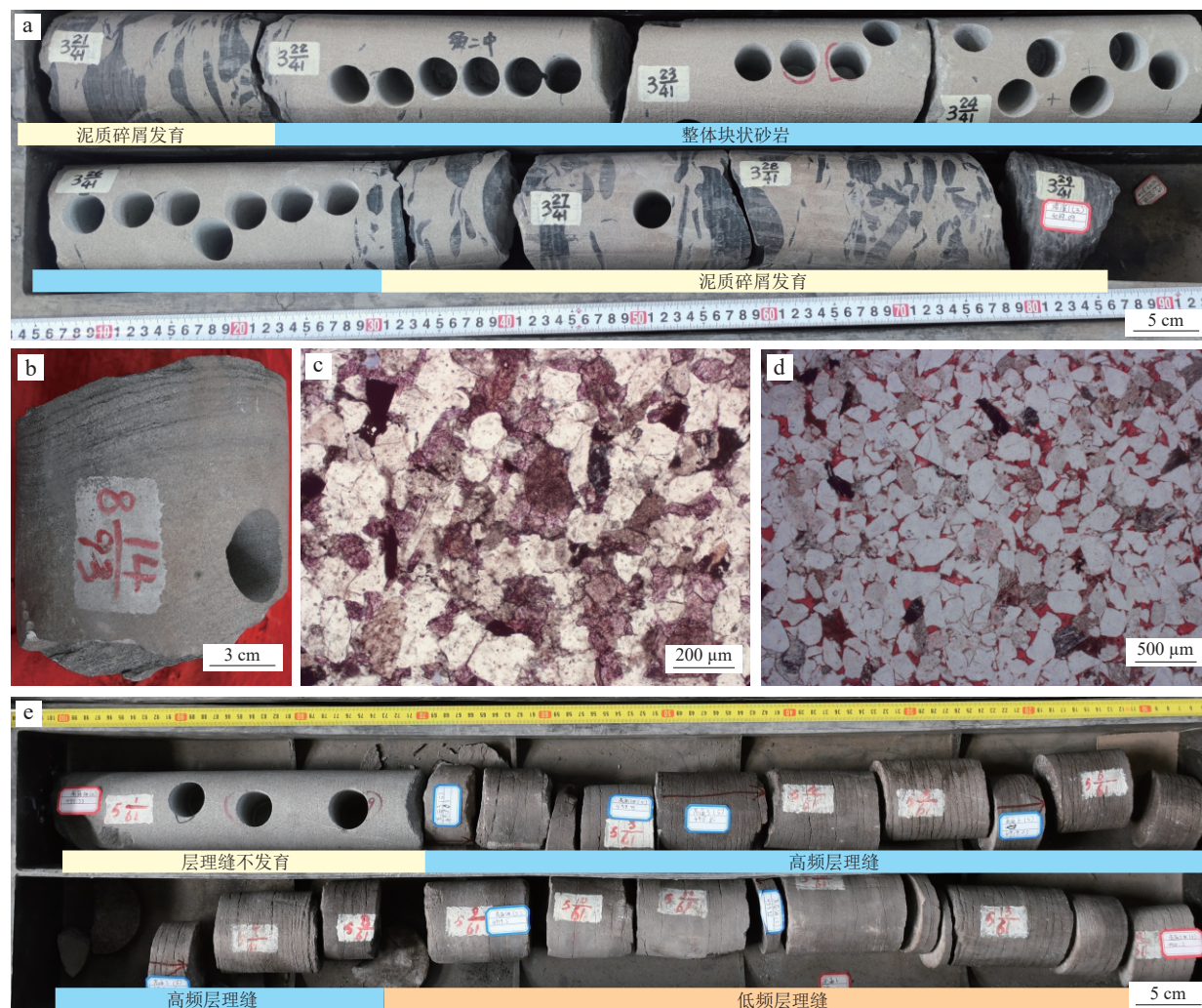


图5 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层沉积、成岩与破裂非均质性

Fig. 5 Sedimentary, diagenetic, and fracture-related heterogeneity of tight elastic reservoirs in the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 洛深1井,埋深4 247.5~4 249.09 m,沉积过程控制的泥质碎屑发育程度导致物质组成的差异,岩心照片;b. 大邑2井,埋深4 984.68~4 984.78 m,沉积过程控制的沉积物粒度和沉积构造的差异,岩心照片;c. 新盛204井,埋深4 685.27 m,碳酸盐岩屑发育控制方解石胶结发育,铸体薄片,单偏光;d. 新场7井,埋深5 189.38 m,绿泥石包壳发育控制储层局部原生孔隙发育,铸体薄片,单偏光;e. 高庙3井,埋深4 918.33~4 920.20 m,层理缝差异发育组合样式,岩心照片

力大小、沉积构型界面和岩相组合类型之间存在明显的相关性(图5e,图6)。

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层中广泛发育的层理缝即表现出明显的非均质性。埋深相近的储层存在层理缝不发育、高频层理缝发育、低频层理缝发育在垂向上组合的现象,指示局部应力差异对层理缝发育状态的控制作用(图5e)。同时,在应力状态接近的情况下,层理缝的发育受原始物质组成和沉积特征控制显著。在原始沉积作用构成的力学薄弱面附近更易发育层理缝,如水下分流河道的粗砂岩段、平行层理发育段、岩相转换面和不同级次的沉积构型界面等(图6)。

薄片尺度的微裂缝分布与构型界面和矿物组成之间存在明显的相关性(图3g—i,图6)。在四级和二级构型界面处更容易形成微裂缝(图6)。同时,当石英和长石含量越高、岩屑含量越低时,越容易形成微裂缝(图3i,图6)。

4 深层-超深层致密砂岩储层非均质性成因

4.1 沉积环境与沉积过程多变

深层-超深层致密碎屑岩储层沉积非均质性主要

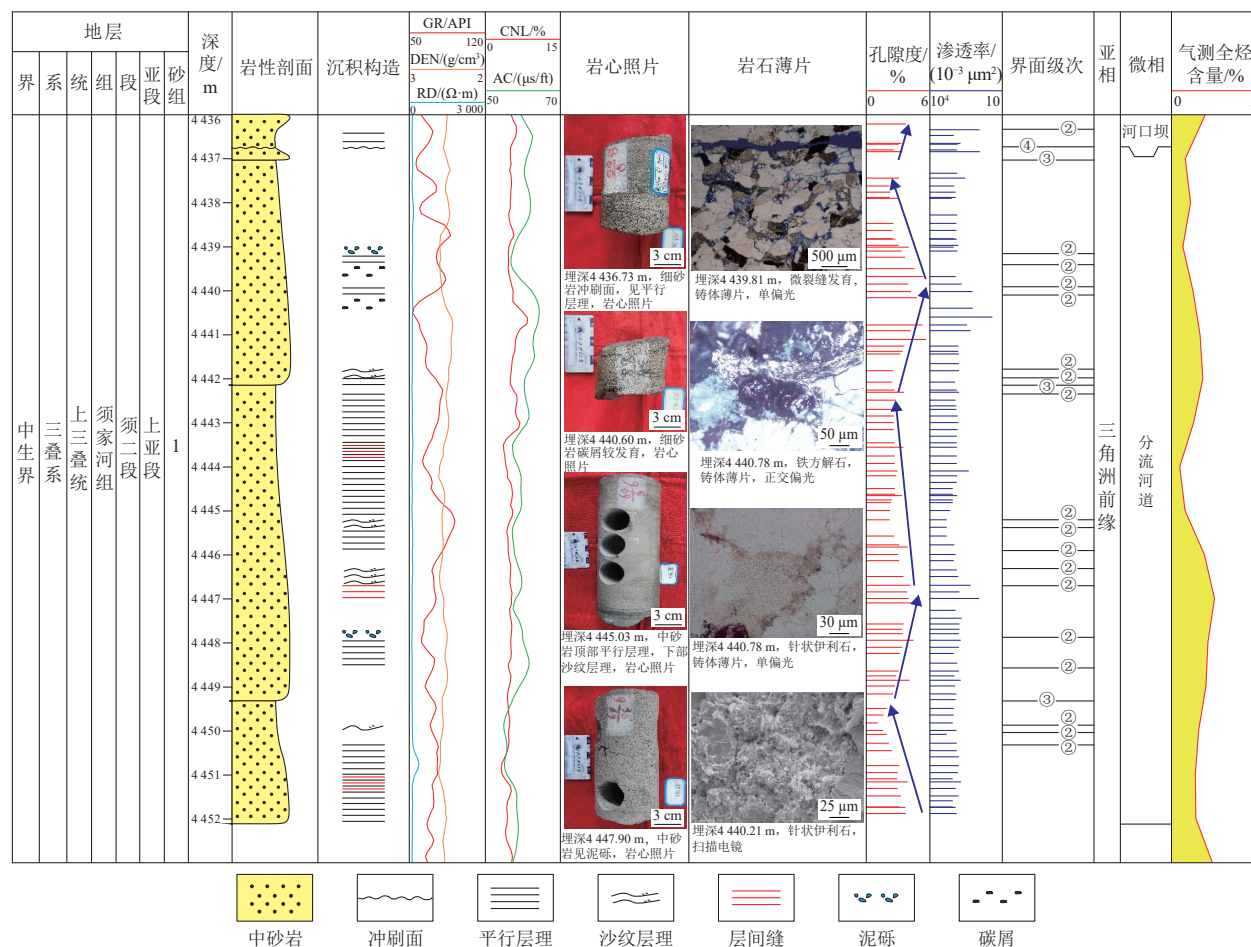


图6 四川盆地川西坳陷川丰563井须二段1砂组致密碎屑岩储层非均质性特征

Fig. 6 Heterogeneity characteristics of tight clastic reservoirs in the first sand group of the Xu 2 Member in well Chuanfeng 563, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

(图中①—④分别表示一级、二级、三级和四级构型界面。)

受控于沉积环境和沉积过程的复杂多变性^[23,30,37]。川西坳陷须二段致密碎屑岩储层主要形成于浅水三角洲前缘沉积环境,以水下分流河道沉积为主,仅发育少量河口坝沉积^[28]。由于浅水三角洲前缘分布范围受频繁湖平面升降变化控制,可发生大范围迁移^[38],导致三角洲前缘水下分流河道砂岩内部叠置关系与侧向迁移样式复杂多变^[28]。厚层砂体内部多包含多期河道砂体的复杂叠置,内部发育不同级次的构型界面(图6)。

单期河道砂体受河流能量频繁波动控制,流体的搬运能力和流态多变,导致内部沉积物粒度和沉积构造复杂多变(图5b,图6),这也是形成单砂体内部小尺度成岩与物性非均质性的主要原因之一^[39]。特别是在河道砂沉积中,流量的急剧变化会导致超临界流沉积与亚临界流沉积频繁转化^[24],进一步加剧单砂体内部的沉积非均质性。

4.2 成岩环境与物质迁移多变

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层与内部及下伏小塘子组的烃源岩构成“自生自储”和“下生上储”的成岩-成藏组合。埋藏过程中,烃源岩排放的高矿化度孔隙流体与有机质热演化不同阶段释放的酸性流体,在沉积非均质性基础上进一步形成成岩非均质性。

储层碳酸盐胶结物碳氧同位素数据表明,氧同位素值越低,对应的碳同位素值也越低(图7a)。这反映了随着埋深增加,有机质热演化形成的有机酸对储层成岩改造越强烈、有机来源的碳不断增加的过程(图7b)。这种成岩环境的渐进式变化进一步控制了孔隙尺度成岩物质的迁移与沉淀过程。在沉积过程控制形成的沉积构型界面与岩相组合框架下,成岩流体的差异流动控制了选择性的胶结与溶蚀作用,进一步加剧了储层的非均质性。

胶结物的生长具有显著的阶段性。不同阶段的石

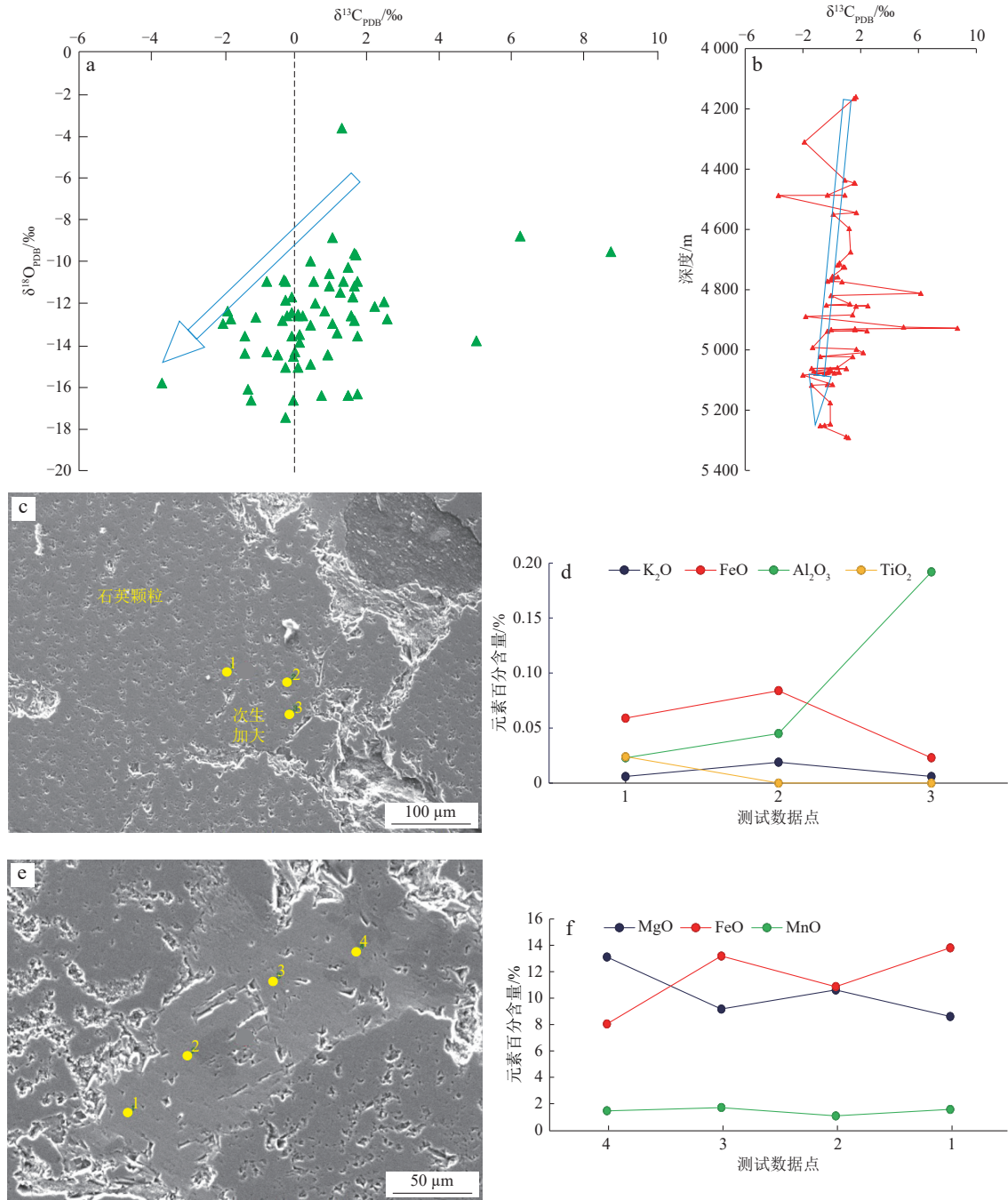


图7 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层胶结物形成过程中的物质迁移过程

Fig. 7 Material migration during cement formation in tight elastic reservoirs of the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin
 a. 碳酸盐胶结物碳氧同位素大小与氧同位素大小相关关系图; b. 碳酸盐胶结物碳同位素大小与储层埋深相关关系图; c. 中江20井, 埋深4 163.55 m, 石英颗粒与加大边电子探针点位分布; d. 中江20井, 埋深4 163.55 m, 石英颗粒与加大边的K-Fe-Al-Ti元素含量折线图; e. 川丰563井, 埋深4 481.29 m, 碳酸盐胶结物电子探针点位分布; f. 川丰563井, 埋深4 481.29 m, 碳酸盐胶结物Mg-Fe-Mn元素含量折线图
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$: PDB标准的碳13同位素值; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$: PDB标准的氧18同位素值; K_2O : 氧化钾; FeO : 氧化铁; Al_2O_3 : 三氧化二铝; TiO_2 : 二氧化钛; MgO : 氧化镁; MnO : 氧化锰

(a图中的黑色虚线表示碳同位素零值标准线; a图和b图中的蓝色箭头表示碳同位素变化趋势; c图和d图中的数字1—4表示测试数据点分布位置代号。)

英次生加大元素组成存在差异(图7e): 紧邻石英颗粒的次生加大与石英颗粒元素组成接近, 指示了压溶物质来源; 最外围的石英次生加大明显富含Al, 指示了潜在的长石溶蚀硅质来源^[40]。碳酸盐胶结物的沉淀

同样具有显著的阶段性: 在同一孔隙范围内, 内部的Mg和Fe含量明显低于外部(图7d), 指示了成岩流体Mg和Fe含量不断增加以及碳酸盐胶结物从核心到外围不断生长的过程。

4.3 应力环境与破裂响应多变

川西坳陷须二段致密碎屑岩储层经历了印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动,早期以发育北东东向或北东向的构造为主,晚期以发育南北向构造为主。由于受到来自扬子地块本身自南向北西的推挤力、来自秦岭造山带自北向南的推挤力和来自青藏高原自西向东的推挤力的持续作用^[41-42],且不同时期不同方向的动力强弱表现不同,形成了研究区复杂的构造应力环境。

不同应力大小与不同成岩演化阶段的耦合作用,导致相同的储层在不同时间表现出不同的破裂特征(图3g,h)。同时,沉积与成岩非均质作用控制不同级次的力学薄弱面发育(图6,图8)。即使在相同的应力环境下,也会发育多尺度的破裂作用(图5e,图6),主

要表现在:相同应力环境下,不同级次的构型界面裂缝发育特征存在显著差异^[43-44](图8)。紧邻断层处的裂缝发育特征受沉积构型的界面控制不显著,随着距离主干断层的增加,不同尺度裂缝发育程度受构型界面控制增强。其中,三级界面控制下裂缝最发育,二级和四级构型界面控制下裂缝发育程度次之^[43]。因此,深层-超深层致密碎屑岩储层沉积与成岩的非均质性会进一步促进储层破裂响应的非均质性,最终形成“沉积-成岩-破裂”耦合的多尺度非均质性特征(图8)。

5 深层-超深层致密砂岩储层非均质性评价

在明确了深层-超深层致密碎屑岩储层非均质性

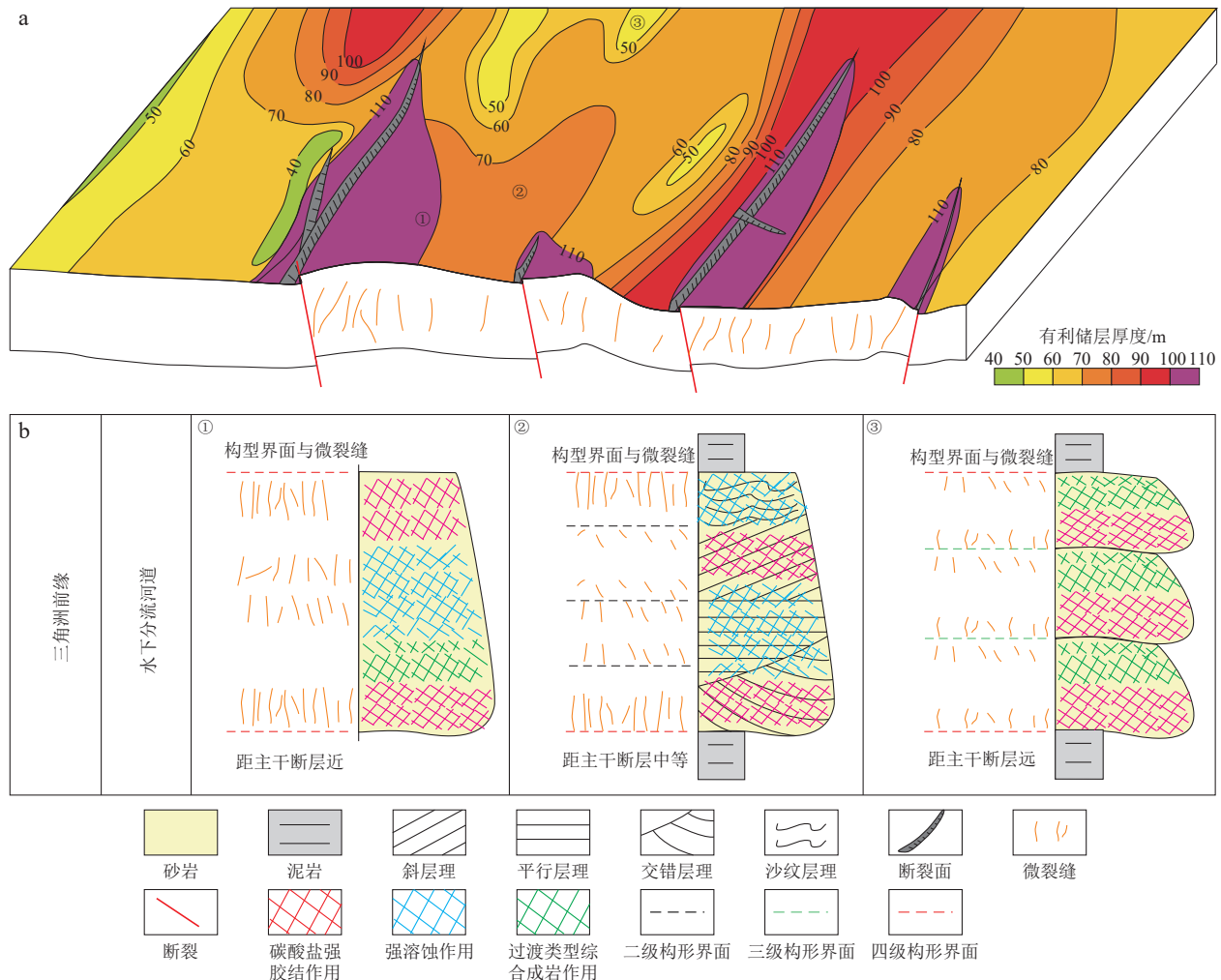


图8 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层不同沉积岩相组合控制的成岩作用与微裂缝发育的差异性模式图

Fig. 8 Conceptual model showing differential diagenesis and microfracture development controlled by different sedimentary lithofacies associations in tight clastic reservoirs of the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 三角洲前缘水下分流河道储层厚度与裂缝发育的三维构型模式图; b. 不同沉积岩相组合控制的成岩作用与微裂缝发育的差异性模式图 (b图中①—③分别代表距主断层近储层、距离主干断层中等储层、距离主干断层远储层在a图中的分布位置。)

表现形式及其成因的基础上,进一步的开展非均质性评价需要以其成因为指导,深入开展沉积过程的精细解析、成岩过程的恢复和破裂响应的定量约束等工作。

5.1 沉积过程精细解析

沉积过程的精细解析是深层-超深层致密碎屑岩储层非均质性研究的基础。现阶段关于碎屑岩沉积相、沉积微相和沉积过程的认识亟待深入。传统的沉积微相类型分析已然不能满足深层-超深层致密碎屑岩储层优质储层分析的精度需求^[11, 22],需要基于沉积过程的解析,形成更高精度的沉积次微相划分方案。特别是在不同的沉积环境中,重新审视超临界流沉积过程及其对相分析过程的优化,形成基于传统分析与

沉积过程分析相互补充的“沉积相-亚相-微相-次微相-岩相组合序列-岩相组合-岩相”分析思路和工作流程(图9)。同时,在 Miall 河流相沉积构型划分思路的基础上^[31],基于沉积过程的差异,形成其他沉积环境的沉积构型划分方案,并明确不同沉积环境的沉积构型要素类型。上述工作对不同沉积环境开展更加精细的沉积非均质性研究具有重要意义^[23, 45]。

5.2 物质迁移原位表征

在沉积非均质性框架下,成岩非均质性的形成主要受物质迁移与沉积过程的控制。特别是在富石英贫长石类的储层中,溶蚀作用对储层的改造影响有限,而不同尺度差异性的胶结作用对储层的成岩非均质性起

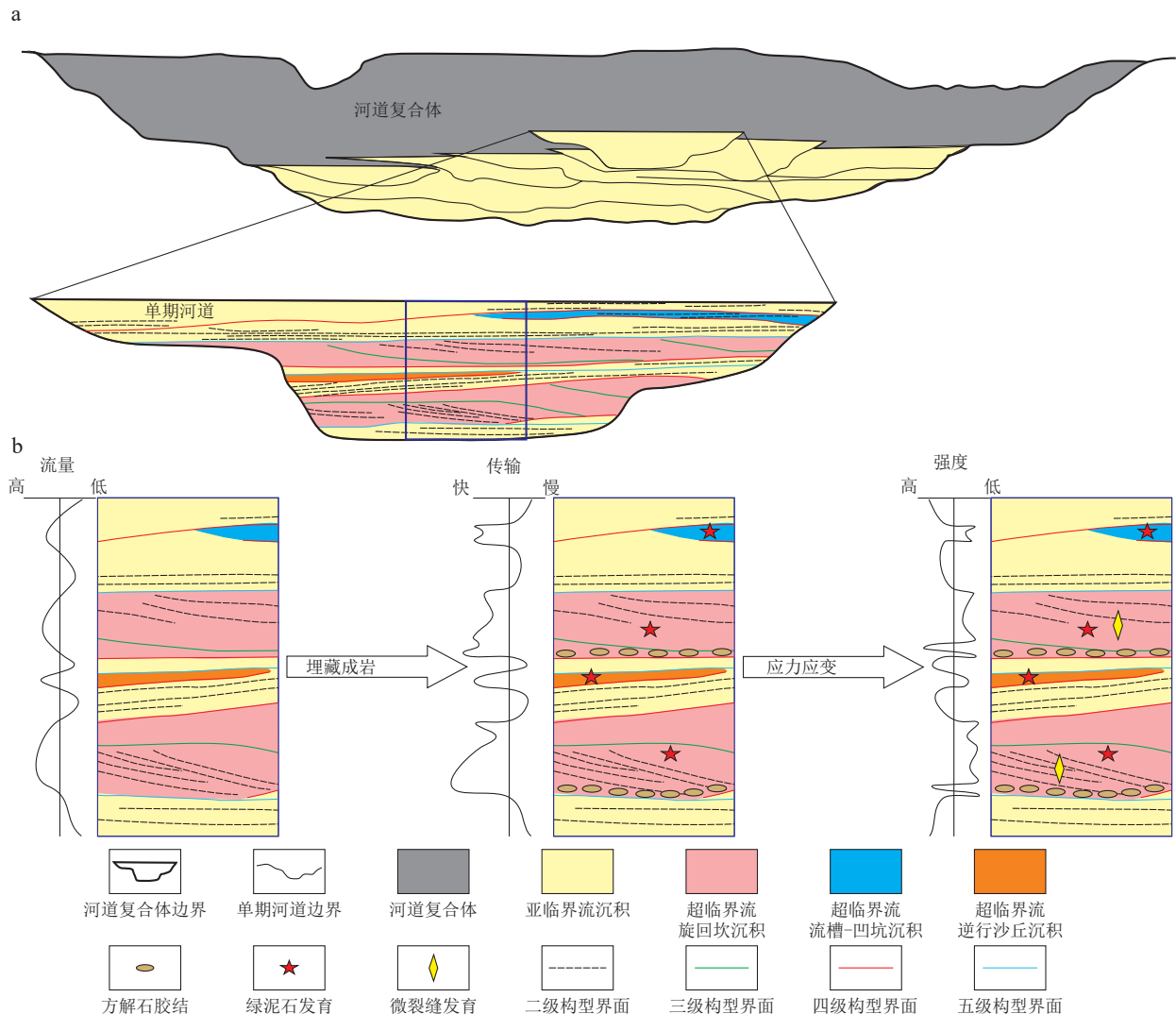


图9 四川盆地川西坳陷须二段致密碎屑岩储层“沉积-成岩-破裂”非均质性综合模式图(据文献[23]修改)

Fig. 9 Comprehensive conceptual model of “sedimentation-diagenesis-fracturing” heterogeneity in tight clastic reservoirs of the Xu 2 Member, western Sichuan Depression, Sichuan Basin (modified after reference [23])

a. 河道复合体-单期河道沉积构型分级示意图; b. 致密碎屑岩储层“沉积-成岩-破裂”非均质性演化序列示意图

(a图中蓝色方框表示b图取样区域。)

着更为重要的控制作用^[16]。胶结作用的形成是成岩物质迁移沉淀的产物。借鉴沉积过程的源-汇系统分析思路,通过对胶结物的精细岩相学分析,辅以高精度的原位地球化学分析,开展成岩过程物质迁移的源-汇示踪分析,是解决胶结物选择性胶结的有效方法^[46]。同时,近年来兴起的碳酸盐胶结物铀(U)-铅(Pb)定年技术和碳酸盐团簇同位素分析技术,使得准确限定碳酸盐胶结物的形成时间成为可能^[47-48],这对准确恢复多构造演化阶段叠合盆地的成岩演化过程意义重大。基于成岩物质迁移过程的源-汇示踪分析思路(图9),是破解深层-超深层致密碎屑岩储层成岩非均质性的有效路径。

5.3 破裂响应定量约束

构造变形导致不同构造部位的局部应力和应变分布产生差异,从而增强裂缝发育的非均质性^[20],但沉积与成岩非均质性同样对深层-超深层致密碎屑岩储层的破裂非均质性起着重要的控制作用。具体而言,沉积过程中不同尺度的构型界面和沉积界面会形成不同尺度的力学薄弱层,而不同的成岩作用类型与强度可能会改变岩石的力学性质,例如大量碳酸盐胶结物沉淀或硅质胶结物沉淀可显著增加岩石脆性。因此,需要开展沉积与成岩非均质性共同控制下的破裂过程力学分析,基于物理模拟和数值模拟实验,定量分析沉积与成岩非均质对破裂过程的控制作用。同时,将沉积与成岩非均质对破裂过程的控制纳入力学模型考虑范围,构建更为合理和更高精度的裂缝分布预测模式(图9),结合数值模拟分析,实现三维空间破裂响应与分布的定量预测。

6 结论

1) 川西坳陷须家河组二段为典型的致密碎屑岩储层。该层段平均孔隙度为3.5%,平均渗透率为 $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的致密储层;整体压实作用强,胶结类型多、期次多、强度大且以碳酸盐胶结和硅质胶结为主,溶蚀作用相对较弱;不同尺度的裂缝广泛发育,表现为多期破裂与充填作用交互;非均质性极强。

2) 川西坳陷须家河组二段储层非均质性表现在物性、物质组成、成岩作用和破裂作用等方面。物性非均质性是其非均质性的具体表现形式,物质组成差异性的内因则是形成这一非均质性的内在关键;沉积非均质性进一步控制储层的差异性成岩改造,深化了成

岩非均质性;应力大小、沉积构型界面和岩相组合类型共同控制破裂非均质性。

3) 深层-超深层致密碎屑岩储层沉积非均质性主要受控于沉积环境和沉积过程的复杂多变性;成岩环境的渐进式演化和沉积构型界面控制下的物质迁移过程加剧成岩非均质性;不同大小的应力与不同级次的力学薄弱面共同约束多尺度的破裂作用,最终形成“沉积-成岩-破裂”耦合的多尺度非均质性。

4) 深入开展沉积过程的精细解析、成岩过程的恢复以及破裂响应的定量约束等工作,是破解深层-超深层致密碎屑岩储层成岩非均质性的有效路径。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 含油气盆地深层-超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(05): 1-12.
JIA Chengzhao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(05): 1-12.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(06): 1-13.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Huili, et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 001-013.
- [3] 曹自成, 耿锋, 任丽丹, 等. 塔里木盆地深层-超深层碳酸盐岩油气勘探历程及新领域[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(4): 395-402.
CAO Zicheng, GENG Feng, REN Lidan, et al. Exploration history and new frontiers of oil and gas in deep to ultra-deep carbonate reservoirs in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(4): 395-402.
- [4] 王春伟, 杨俊, 赵东睿, 等. 准噶尔盆地永进——征沙村地区侏罗系超深层致密砂岩储集层分级评价[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(01): 48-56.
WANG Chunwei, YANG Jun, ZHAO Dongrui, et al. Grading evaluation of Jurassic ultra-deep tight sandstone reservoirs in Yongjin Zhengshacun area, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(1): 48-56.
- [5] 刘佳庚, 王艳忠, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷民丰洼陷陡坡带深层-超深层碎屑岩优质储层控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(05): 1203-1217.
LIU Jiageng, WANG Yanzhong, CAO Yingchang, et al. Factors controlling the development of deep and ultra-deep coarse-grained siliciclastic reservoirs with high quality in the steep slope zone of the Minfeng sub-sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1203-1217. DOI:10.11743/ogg20230510.

- [6] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(06): 707-714.
- CAI Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: An example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.
- [7] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(04): 679-691.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 679-691.
- [8] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩, 等. 全油气系统的4种基本类型及其资源开发领域[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(04): 1019-1038.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan, et al. Four basic types of whole petroleum systems and their major plays [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1019-1038.
- [9] 庞雄奇, 崔新璇, 贾承造, 等. 全油气系统理论在实用中面临的几个问题与解决方法[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(04): 1039-1054.
- PANG Xiongqi, CUI Xinxuan, JIA Chengzao, et al. Challenges and solutions in the application of the whole petroleum system theory [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1039-1054.
- [10] 王继远, 王斌, 胡宗全, 等. 深层-超深层碎屑岩优质储层成因机理——以准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(01): 151-166.
- WANG Jiyuan, WANG Bin, HU Zongquan, et al. Genetic mechanisms of high-quality deep to ultra-deep clastic reservoirs: A case study of the Permian-Triassic strata in the hinterland of the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 151-166.
- [11] 宋雯丹, 徐朝晖, 徐怀民, 等. 塔里木盆地克深气田构造裂缝主控因素及发育模式[J]. 现代地质, 2026, 40(02): 356-372.
- SONG Wendan, XU Zhaohui, XU Huaimin, et al. Main Controlling Factors and Development Model of Tectonic Fractures in Keshen Gas Field, Tarim Basin [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(2): 356-372.
- [12] 李阳兵. 川西坳陷新场构造带须二段致密砂岩储层特征及综合评价[J]. 断块油气田, 2024, 31(04): 629-636.
- LI Yangbing. Characteristics and comprehensive evaluation of tight sandstone reservoirs in Xu 2 Member of Xinchang structural belt in western Sichuan Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(4): 629-636.
- [13] 赵俊威, 陈恭洋, 赵星, 等. 川西新场地区须二段致密砂岩气藏气水分布特征及主控因素[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 1-13.
- ZHAO Junwei, CHEN Gongyang, ZHAO Xing, et al. Gas-water distribution characteristics and main controlling factors of tight sandstone gas reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(3): 1-13.
- [14] Huang Y, Deng M, Duan N, et al. Sand body architecture of braided river deltas in the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Energy Geoscience, 2025, 6(01): 92-103.
- [15] MORAD S, KHALID A R, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. AAPG Bulletin, 2010, 4(8): 1267-1309.
- [16] 罗晓容, 杨海军, 王震亮, 等. 深层-超深层碎屑岩储层非均质性特征与油气成藏模式[J]. 地质学报, 2023, 97(09): 2802-2819.
- LUO Xiaorong, YANG Haijun, WANG Zhenliang, et al. Heterogeneity characteristics of clastic reservoirs and hydrocarbon accumulation mode in deep-ultra-deep basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(09): 2802-2819.
- [17] 李忠. 沉积盆地深层-超深层成岩动力学:若干研究进展与专属问题[J]. 沉积学报, 2023, 41(06): 1768-1780.
- LI Zhong. Research advances and specific scientific issues of diagenetic dynamics in deeply to ultra-deeply buried sedimentary basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(06): 1768-1780.
- [18] 朱如凯, 孙龙德, 张天舒, 等. 中国油气勘探开发中的沉积学研究新进展与发展方向[J/OL]. 沉积学报, 1-25.
- ZHU Roukai, SUN Delong, ZHANG Tianshu, et al. Advances and Trends in Sedimentological Research in Oil and Gas Exploration and Development in China [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 1-25.
- [19] 罗晓容, 王忠楠, 雷裕红, 等. 特超低渗砂岩油藏储层非均质性特征与成藏模式——以鄂尔多斯盆地西部延长组下组合为例[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 87-98.
- LUO Xiaorong, WANG Zhongnan, HU Caizhi, et al. Heterogeneity characteristics and accumulation model of ultra-low permeability sandstone reservoirs: a case study of the lower part of Yanchang Formation in the western Ordos Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 87-98.
- [20] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 1-14.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 1-14.
- [21] 张月, 韩登林, 杨铨晔, 等. 超深层碎屑岩储层裂缝充填流体迁移规律——以库车坳陷克深井区白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 292-300.
- ZHANG Yue, HAN Denglin, YANG Chengye, et al. Migration law of fracture filling fluid in ultra-deep clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen well block, Kuqa depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 292-300.
- [22] 罗晓容, 张立强, 张立宽, 等. 碎屑岩输导层非均质性与油气运聚成藏[J]. 石油学报, 2020, 41(03): 253-272.
- LUO Xiaorong, ZHANG Liqiang, ZHANG Likuan, et al. Heterogeneity of clastic carrier bed and hydrocarbon migration and

- accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 253–272.
- [23] LOWE D G, ARNOTT R W C. Composition and Architecture of Braided and Sheetflood-Dominated Ephemeral Fluvial Strata In the Cambrian – Ordovician Potsdam Group: A Case Example of the Morphodynamics of Early Phanerozoic Fluvial Systems and Climate Change[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(6): 587–612.
- [24] FIELDING C R, ANLEXANDER J, ARGIRO A. Towards a new generation of fluvial facies models for the interpretation of ancient deposits, based on inter-annual peak discharge variance of modern rivers[J]. *Sedimentology*, 2024, 71(1): 275–329.
- [25] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层-超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 112–140.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 112–140.
- [26] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1015–1026.
- SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1015–1026.
- [27] 郭彤楼, 熊亮, 叶素娟, 等. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践: 四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 24–37.
- GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, et al. Theory and practice of unconventional gas exploration within carrier beds: Insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 24–37.
- [28] 邓文龙, 叶泰然, 纪友亮, 等. 川西新场构造带须二段浅水三角洲砂体结构特征及控制因素[J]. *古地理学报*, 2024, 26(03): 545–566.
- DENG Wenlong, YE Tairan, JI Youliang, et al. Sand body architecture and controlling factors of shallow water delta in the Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt, western Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024, 26(03): 545–566.
- [29] 李伟, 王雪柯, 赵容容, 等. 川西前陆盆地上三叠统须家河组致密砂岩气藏超压体系形成演化与天然气聚集关系[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 25–39.
- LI Wei, WANG Xueke, ZHAO Rongrong, et al. Formation and evolution of overpressure system in tight sandstone gas reservoir of Xujiahe Formation of Upper Triassic in the Western Sichuan foreland basin and its relationship with natural gas accumulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 25–39.
- [30] 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.
- LIU Junlong, LIU Zhongqun, XIAO Kaihua, et al. Characterization of favorable lithofacies in tight sandstone reservoirs and its significance for gas exploration and exploitation: A case study of the 2nd Member of Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1111–1121.
- [31] 雷越, 黄崧, 王旭丽等. 川西北地区须家河组二段致密砂岩储层特征及其主控因素[J]. *特种油气藏*: 1–10[2023–08–07].
- Lei Yue, Huang Qian, Wang Xuli et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of tight sandstone in the second member of Xujiahe Formation, Northwest Sichuan[J]. *Special oil and gas reservoirs*: 1–10[2023–08–07].
- [32] 章顺利, 杨映涛, 张玲等. 川西拗陷须二段次生石英形成机理及其对储集层物性的影响[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(01): 25–32.
- Zhang Shunli, Yang Yingtao, Zhang Ling et al. Formation mechanism of secondary quartz and its influence on reservoir physical properties in Xu2nd Member, Western Sichuan Depression[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(01): 25–32.
- [33] 张迪, 王显东, 王有智, 等. 四川盆地仪陇-平昌地区须家河组致密砂岩气储层微观孔隙结构及其对储层物性的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(04): 51–59.
- ZHANG Di, WANG Xiangdong, WANG Youzhi, et al. Microscopic pore structure of tight sandstone gas reservoirs of Xujiahe Formation in Yilong-Pyeongchang area of Sichuan Basin and its influence on reservoir physical properties[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(4): 51–59.
- [34] 王有智. 四川盆地营山地区须家河组二段致密砂岩气藏特征及有利目标区[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(2): 19–27.
- WANG Youzhi. Characteristics of tight sandstone gas reservoirs and favorable targets in Xu2 Member of Xujiahe Formation in Yingshan area of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(2): 19–27.
- [35] 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裂裂缝体特征和地质模式[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3).
- LIU Junlong, LIU Zhongqun, LIU Zhenfeng, et al. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3).
- [36] 崔蓉, 杨田, 蔡来星, 等. 川西须家河组二段深层致密砂岩储层伊利石晶间孔成因[J/OL]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 1–18.
- CUI Rong, YANG Tian, CAI Laixing, et al. Characteristics and genesis of illite intercrystalline pore of tight sandstone reservoirs in the second member of the Xujiahe Formation, western Sichuan Depression[J/OL]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 1–18.

- [37] JACKSON W A, HAMPSON G J, JACQUEMYN C, et al. A screening assessment of the impact of sedimentological heterogeneity on CO₂ migration and stratigraphic-baffling potential: Johansen and Cook formations, Northern Lights project, offshore Norway[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 120: 103762.
- [38] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, (6): 813-825.
- ZHOU Caineng, ZAO Wenzhi, ZHANG Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, (6): 813-825.
- [39] HEIDSIEK M, BUTSCHER C, BLUM P, et al. Small-scale diagenetic facies heterogeneity controls porosity and permeability pattern in reservoir sandstones[J]. Environ Earth Sci, 2020, 79: 425.
- [40] YANG T, CAO Y C, FRIIS H, et al. Diagenesis and reservoir quality of lacustrine deep-water gravity-flow sandstones in the Eocene Shahejie Formation in the Dongying sag, Jiyang depression, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104 (5): 1045 - 1073.
- [41] 张庄, 章顺利, 何秀彬, 等. 川西坳陷须家河组二段裂缝发育特征及形成主控因素——以合兴场气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(05): 581-590.
- ZHANG Zhuang, ZHANG Shunli, HE Xiubin, et al. Development characteristics of fractures in the second member of Xujiahe Formation in Hexingchang Gas Field, western Sichuan Depression and their main control factors of formation: A case study of Hexingchang Gas Field [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(5): 581-590.
- [42] 殷雪峰, 刘明. 川东北通江—马路背地区须家河组断裂结构特征与裂缝发育规律[J]. 石油实验地质, 2026, 48 (02): 471-481.
- YIN Xuefeng, LIU Ming. Fault structure characteristics and fracture development patterns in Xujiahe Formation of Tongjiang - Maolubearea, northwestern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2026, 48(2): 471-481.
- [43] 李莉妃, 任启强, 杨田, 等. 多级构型界面下致密砂岩储层构造裂缝发育特征——以川西坳陷须家河组二段为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 722-734.
- LI Lifei, REN Qiqiang, YANG Tian, et al. Development characteristics of structural fractures in tight sandstone reservoirs under multi-level configuration interfaces: a case study of second member of Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(4): 722-734.
- [44] 阎丽妮, 朱宏权, 叶素娟, 等. 新场构造带须家河组二段“饼状”缝的成因及油气地质意义[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(5): 559-568.
- YAN Lini, ZHU Hongquan, YE Sujuan, et al. Origin of "cake-like" fractures and its significance for gas exploration in the second member of Xujiahe Formation of Xinchang structural belt [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(5): 559-568.
- [45] MIALD A D. Stratigraphy: A Modern Synthesis [D]. Canada: Springer International, 2016.
- [46] MAITAN R, FIELDING C R, MOODY J A, et al. The impact of high discharge variability on sedimentology and architecture of bar deposits in the meandering Powder River (Montana, USA) [J]. Sedimentology, 2025.
- [47] YANG Tian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Formation of zoned ankerite in gravity-flow sandstones in the Linnan Sag, Bohai Bay Basin, eastern China: Evidence of episodic fluid flow revealed from in-situ trace elemental analysis [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104139.
- [48] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929-953.
- ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUAN Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 929-953.

(编辑 王迪)