

文章编号: 1000-0550 (2025) 00-0000-00

致密砂岩孔隙形成机制与差异成岩演化

——以四川盆地上三叠统须家河组为例

林良彪¹, 余瑜¹, 朱宏权², 翟常博³, 王威⁴, 杨映涛², 刘君龙³,
黄彦庆³, 曾韬⁴, 刘明⁴, 邱玉超⁵, 金值民⁵

1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 沉积地质研究院, 成都 610059

2. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041

3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石油化工股份有限公司勘探分公司, 成都 610041

5. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610051

摘要 【目的】四川盆地上三叠统须家河组蕴藏丰富的致密砂岩气资源, 但多物源背景造就了须家河组砂岩复杂多样的岩石组成。该研究以四川盆地须家河组的须二段和四段为例, 探讨须家河组多物源背景下的岩石结构、储层特征及优质储层孔隙形成机制, 分析差异成岩演化下的优质储层形成机理, 以期须家河组致密砂岩的油气勘探提供依据, 为具有相似多物源背景的致密砂岩层系的油气勘探提供借鉴。【方法】综合运用铸体薄片、物性测试、扫描电镜、电子探针、阴极发光、X 射线衍射和包裹体激光拉曼等测试分析技术, 明确了研究区致密砂岩孔隙形成机制与差异成岩演化过程。【结果】(1) 物源差异导致须家河组砂岩组分差异显著, 进而控制成岩路径与孔隙演化。川西坳陷和川北地区等盆地边缘的近物源区发育贫长石的砂岩, 形成裂缝—孔隙复合储集系统; 远源混源区(如川中、川南等)形成了富长石、含长石的基质孔隙型储层。(2) 高刚性碎屑颗粒与早期绿泥石化包膜等因素协调抑制压实与部分胶结作用, 促使深埋藏(>5000 m)砂岩原生粒间孔得以保存。(3) 有机酸溶蚀、大气淡水淋滤及裂缝相关深部流体造成长石、岩胶岩和碳酸盐岩屑的溶蚀是次生孔隙主控因素, 但时空分布差异特征明显。【结论】多物源背景通过控制原始岩石结构差异, 叠加埋藏阶段的埋藏—抬升过程、构造裂缝发育特征、水—岩流体反应等因素的影响, 使得四川盆地须家河组砂岩形成了如今差异显著的储层特征。

关键词 致密砂岩; 多物源体系; 成岩演化; 孔隙形成机制; 须家河组; 四川盆地

第一作者简介 林良彪, 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 沉积地质学, E-mail: linliangbiao08@cdut.cn

通信作者 余瑜, 男, 副研究员, 储层沉积学, E-mail: yuyucdut@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.034

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.034

0 引言

致密砂岩成岩演化过程复杂, 漫长的埋藏成岩过程中各类成岩改造影响着储层的岩矿组成、储集空间及孔隙演化^[1-2], 造成相对优质储层分布规律复杂, 受沉积相带、成岩作用、

收稿日期: 2025-04-01; 收修改稿日: 2025-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202128) [Foundation: National Natural Foundation of China, No. 42202128]

构造活动及烃类充注等多方面因素的影响^[3-9]。明确影响致密砂岩中优质储层分布规律的主控因素、阐明致密砂岩储层致密化过程、厘定储层致密与油气成藏的耦合关系是实现致密砂岩气储层高效勘探开发的基础和关键。

不同的物质来源和不同的沉积环境下形成的砂岩在碎屑骨架颗粒、初始孔隙度、岩相及孔隙流体等性质上存在着明显的差异,进而影响着砂岩的成岩作用类型与演化过程、孔隙发育特征和物性特征^[10-11]。而同一地区、同一时期的砂岩因岩石组构特征的不同其成岩作用、储层演化存在着差异性,造成储层的致密化过程与致密储层成因的不同,同时也是造成储层非均质性的关键因素之一^[12-15]。因此,对于低孔—低渗的致密砂岩储层来说,探究基于砂岩岩石组构差异的成岩演化过程是分析致密砂岩储层致密化过程、形成机理与优质储层分布的关键。

四川盆地致密砂岩油气资源丰富,主要富集于上三叠统须家河组和侏罗系等碎屑岩层系中^[16-24]。四川盆地须家河组天然气勘探开发历史悠久,迄今为止已发现了元坝、中坝、平落坝、新场、高庙—丰谷、合川等多个致密砂岩气藏(图 1a)^[16,21,23]。晚三叠世是四川盆地构造沉积演化的关键时期,盆地西缘龙门山造山带的隆升使得盆地与古特提斯洋相互隔绝,从此四川盆地进入陆相湖盆演化阶段^[25-27]。前人研究表明,四川盆地须家河组沉积时期,盆地受到西缘龙门山、东北缘大巴山、东南缘雪峰古陆、西南缘康滇古陆等物源体系的影响,具有明显的多物源特征^[25,28-33]。这种复杂的物源背景下造就了须家河组砂岩复杂多样的岩石组成,进一步地影响了致密砂岩的储层类型和特征。探讨须家河组多物源背景下的岩石组构、储层特征及演化差异,有助于理解盆地尺度上的有利储层形成机理与分布规律。因此,笔者基于多年来四川盆地须家河组的研究成果,结合已发表的文献资料,以四川盆地须家河组二段和四段为例,分析了不同源区影响下的须家河组储层特征,探讨了差异演化下致密砂岩优质储层的形成机理,以期为四川盆地须家河组致密砂岩的油气勘探提供依据,为具有相似多物源背景的致密砂岩层系的油气勘探提供借鉴。

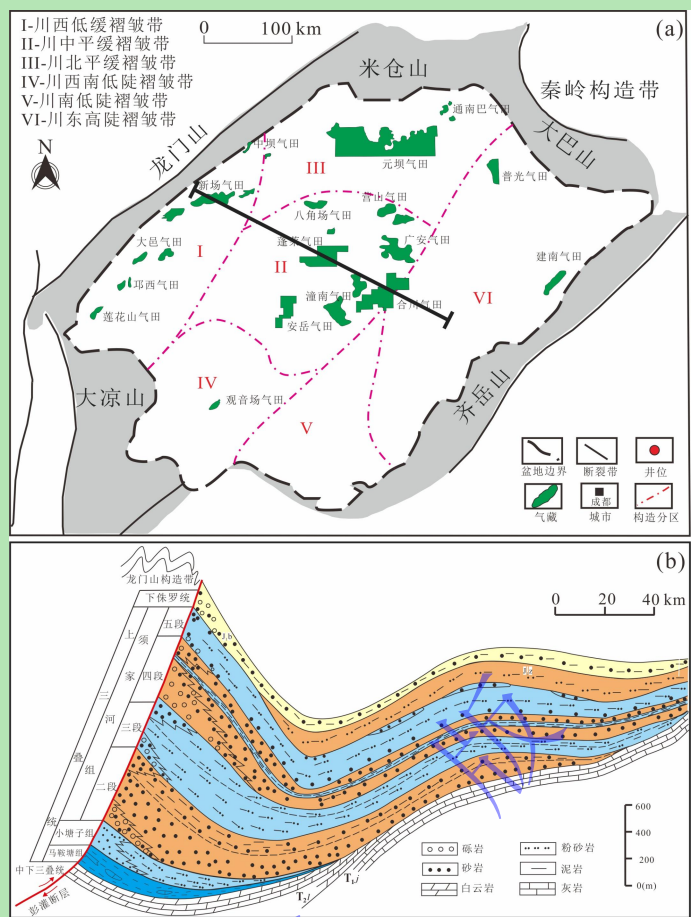


图1 (a) 四川盆地及周缘构造特征、构造单元划分及须家河组主要气藏分布 (气藏分布据文献[23])；
(b) 川西—川中北西—南东向的晚三叠—侏罗纪地层剖面 (据文献[39]修改)
Fig.1 (a) Structural characteristics, tectonic unit division of the Sichuan Basin and its periphery, and distribution of major gas reservoirs in the Xujiache Formation (gas reservoir distribution data from [23]); (b) NW-SE trending Upper Triassic-Jurassic stratigraphic profile across Western-to-Central Sichuan (modified from reference [39])

1 地质背景与物源沉积演化

1.1 区域地质概况

四川盆地经历过多次的构造活动，是典型的多旋回性克拉通盆地^[34-36]。震旦纪至中三叠世，四川盆地总体上在拉张环境下形成地台层序，以海相碳酸盐沉积为主^[37]。晚三叠世至始新世，盆地在挤压环境下形成了前陆盆地，以陆相沉积为主，发育河流相、三角洲相和湖泊相砂泥岩；在喜马拉雅运动的影响下，渐新世以来盆地以褶皱隆升为主^[37]。中—晚三叠世的印支运动结束了四川盆地的海相沉积演化，使得盆地进入陆相湖盆演化阶段^[25-26]，盆地周缘在中三叠世末期开始隆升，盆地的菱形轮廓显雏形^[38]。四川盆地据现今地貌可划分为6个构造分区（图1a），须家河组气藏主要分布在川西、川北和川中地区，其他地区零星分布。

四川盆地上三叠统自下而上发育马鞍塘组、小塘子组（又称为须一段）、须家河组（图1b），与下伏地层中三叠统雷口坡组的微晶白云岩、上覆地层下侏罗统白田坝组均呈平行不

整合接触（图2）。须家河组是发育于诺利阶（Norian）至瑞替阶（Rhaetian）的海陆过渡相地层^[30,41]，前人在野外地质调查、地震、古生物等资料的基础上，按岩性将须家河组划分为6段，其中须一段、须三段、须五段岩性以暗色泥页岩夹粉砂岩、细砂岩为主，局部发育煤线，是研究区内主要的烃源岩；须二段、须四段、须六段岩性以细一中粒砂岩为主，夹有泥页岩、煤线，局部可见砾岩、含砾砂岩发育，是研究区内主要的储集岩^[25,27]。

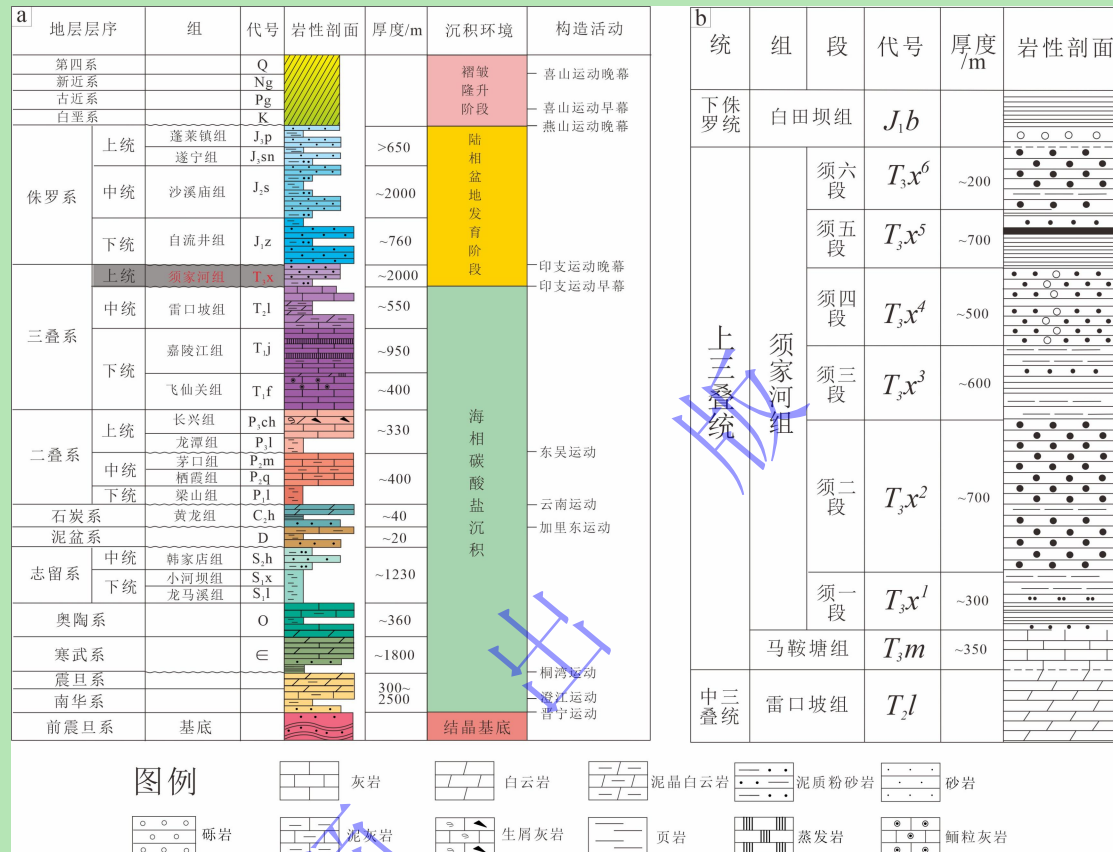


图2 (a) 四川盆地地层系统和构造运动简图（据文献[36-37,40]修改）；(b) 四川盆地上三叠统岩性特征（据文献[27]修改）

Fig.2 (a) Simplified stratigraphic system and tectonic evolution of the Sichuan Basin (modified from references [36-37, 40]); (b) lithological characteristics of the Upper Triassic in the Sichuan Basin (modified from reference [27])

1.2 须家河组物源与沉积演化概况

四川盆地晚三叠世的演化主要受控于构造的演化，古地理演化经历了由海相环境—海陆过渡相环境—陆相环境的转变，盆地具有多物源、相变快等特点，其中马鞍塘组为海相沉积环境，小塘子组（即须家河组一段）—须家河组三段为海陆过渡相沉积环境，须家河组四段—六段为陆相沉积^[23,42-43]。上三叠统须家河组的沉积具有多物源的特点：一是盆地周缘存在多个造山带，包括西部的龙门山造山带、北部的米仓山—大巴山造山带、东南部的雪峰古隆起、南部的黔中古隆起和西南部的康滇古陆，影响川西地区的物源主要是龙门山造山带、米

仓山一大巴山造山带和康滇古陆；二是龙门山造山带和米仓山一大巴山造山带周期性的强烈逆冲推覆活动和持续隆升，加大了西部和北部两个方面物源的供给^[31]。因此，盆内上三叠统巨厚的充填地层，伴随周缘构造山系多期次的挤压推覆以及盆地的沉降，充填序列在垂向上周期性出现以砾石为代表的盆缘巨厚冲积扇相楔状体和盆内以黑色页岩为标志的最大湖侵层，在横向上则表现为不同的沉积体系配置和沉降中心的迁移^[43]。这种多物源区的特点也明显反映出须家河组砂岩的类型及各组分的空间变化、地球化学分布规律，物源区母岩持续地向沉积盆地提供陆源碎屑，经沉积、成岩等作用形成碎屑岩储层，储层的储集物性与陆源碎屑的成分密切相关。

2 样品与测试分析方法

本研究所用全部样品均采自钻井岩心。实验过程中共制作厚度为 0.03 mm 的铸体薄片 100 件，使用蓝色环氧树脂铸体并用茜素红染色以区分碳酸盐矿物，在成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室用尼康 E600PO+偏光显微镜进行观察与拍照。此外，收集四川盆地须家河组 113 口取心钻井的岩石薄片数据，其中须二段 8 132 件、须四段 4 935 件。物性测试共完成 114 件样品，测试由中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院分析实验中心采用高压岩心气测渗透率仪完成。同时，收集 132 口取心井的物性测试数据包括须二段 13 078 件和须四段 7 808 件。全岩 X 射线衍射（XRD）和黏土 X 射线衍射由四川科源工程技术测试中心完成，仪器型号为 X 射线衍射仪 XpertPowder，共完成样品 94 件。

阴极发光测试选用 12 件未盖片薄片，使用 CL8200 MK5-2 型阴极发光仪结合偏光显微镜进行，测试条件为加速电压 15 kV、电流 50 μ A。扫描电镜与能谱分析选取 10 件岩心样品，制备为 8 mm×8 mm×4 mm 的小块，采用 Quanta 250 FEG 场发射环境扫描电子显微镜系统，配合 Inca X-Max 20 电制冷式能谱仪，环境条件为温度 20 $^{\circ}$ C、湿度 50%。电子探针分析选用 5 件样品，仪器型号为岛津 EPMA-1720H Series，工作电压为 15 kV，束流为 10 nA。元素含量分析使用 10 μ m 束斑，对 Ca、Mg、Na、K、Al、Mn、Fe 等元素进行定量分析，参考标准物质包括：Na-NaAlSi₃O₈（钠长石）、K-KAlSi₃O₈（钾长石）、Mg-MgSiO₃、Ca-CaSiO₃、Al-Al₂O₃、Mn 和 Fe-Mn₃Fe₂，其中丰度大于 5%的元素分析精度优于 1%，小于 1%的元素分析精度优于 5%。矿物元素面扫描分布图采用 K α 线获取，分析条件为加速电压 15 kV、束流 50 nA、束斑直径 5 μ m。最后，选取 2 件样品制备为双面抛光、厚度为 0.1 mm 的薄片，开展包裹体拉曼测试以判定其成分，测试仪器为 Renishaw inVia 系列激光共焦显微拉曼光谱仪，配备 Leica 显微镜。上述所有实验均在成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室

完成。

3 致密砂岩储层特征

3.1 砂岩组分特征

四川盆地须二段和须四段的砂岩三角投点如图 3 所示。须二段砂岩(图 3a、图 4)以岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主,其次为岩屑石英砂岩和岩屑长石砂岩,石英砂岩、长石石英砂岩和长石砂岩含量较低,表明四川盆地须二段岩石类型和组分复杂。须四段砂岩(图 3b、图 4)以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,岩屑长石砂岩和石英砂岩含量较低。纵横向对比分析表明,川中、川西南、川南和川东北普光等地区须二和须四段的砂岩类型和含量变化较小,而在靠近盆地西部的川东北元坝、通江—马路背、川西北和川西坳陷等地区砂岩特征变化显著,主要体现在长石含量明显下降、岩屑含量显著上升,特别是靠近岩屑端元的样品变多(图 3),这与川西盆缘的龙门山造山带的隆升造成邻近地区岩石组分的变化有关。目前的主流观点认为,龙门山造山带在须二—须四段沉积时期逐渐隆升成陆,且呈现由北向南逐渐隆升的趋势^[26-27]。龙门山造山带在须二段沉积中晚期在盆地西缘北侧开始活动,影响了川东北的元坝地区和川西北地区,随后向南不断隆升,影响了川西北和川西坳陷,到了须四段沉积时期,川中坳陷中段新场—丰谷等地区在纵向上沉积了多套钙屑砂岩(以碳酸盐岩岩屑为主的砂岩,图 5)。而在须四段沉积时期,川西南的岩石组分特征较须二段沉积时期几乎没有变化,薄片观察也未见钙屑的存在。

就整体碎屑颗粒含量来说,须二段较须四段除了具有长石含量较高、岩屑含量较低的特征外,另一个主要差异体现在石英砂岩的减少。须二段时期,四川盆地发育海相三角洲沉积体系,在川东北通江—马路背地区、川西坳陷和元坝西等地区发育滨岸沉积相带,在高能环境下受波浪淘洗作用沉积了成分成熟度极高的石英砂岩(图 4b)、岩屑石英砂岩(图 4c)等,而到须四段沉积期,随着盆地完成了由海相到陆相的沉积转变,海相滨岸沉积相不再发育,石英砂岩的占比显著下降。

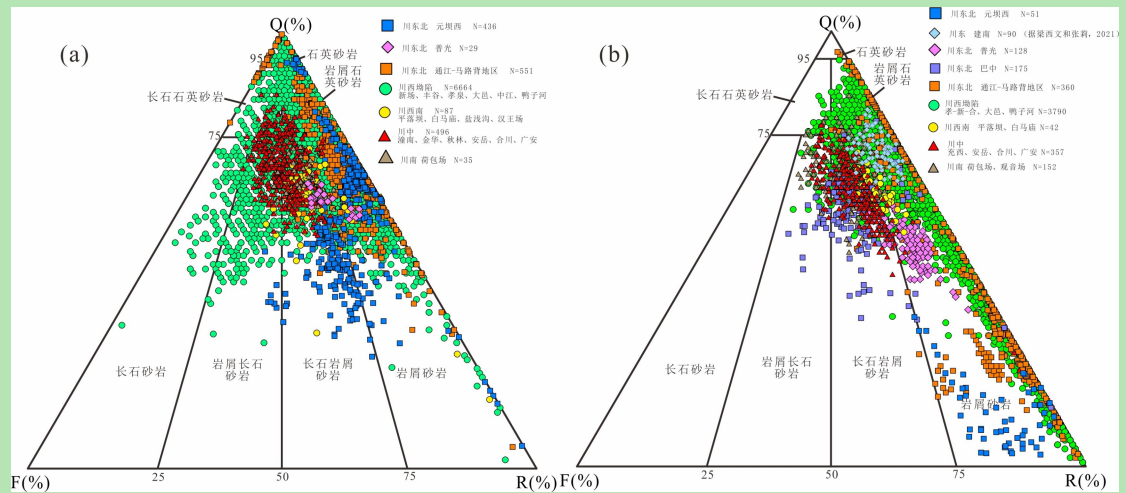


图3 四川盆地须二段 (a) 和须四段 (b) 砂岩三角投点图 (砂岩分类据文献[44], 建南地区数据根据文献[45])

Fig.3 Ternary diagrams for sandstone compositions in the Sichuan Basin: (a) Member T_{3x2}; (b) Member T_{3x4} (sandstone classification after reference [44]; data of Jianna area after from reference [45])

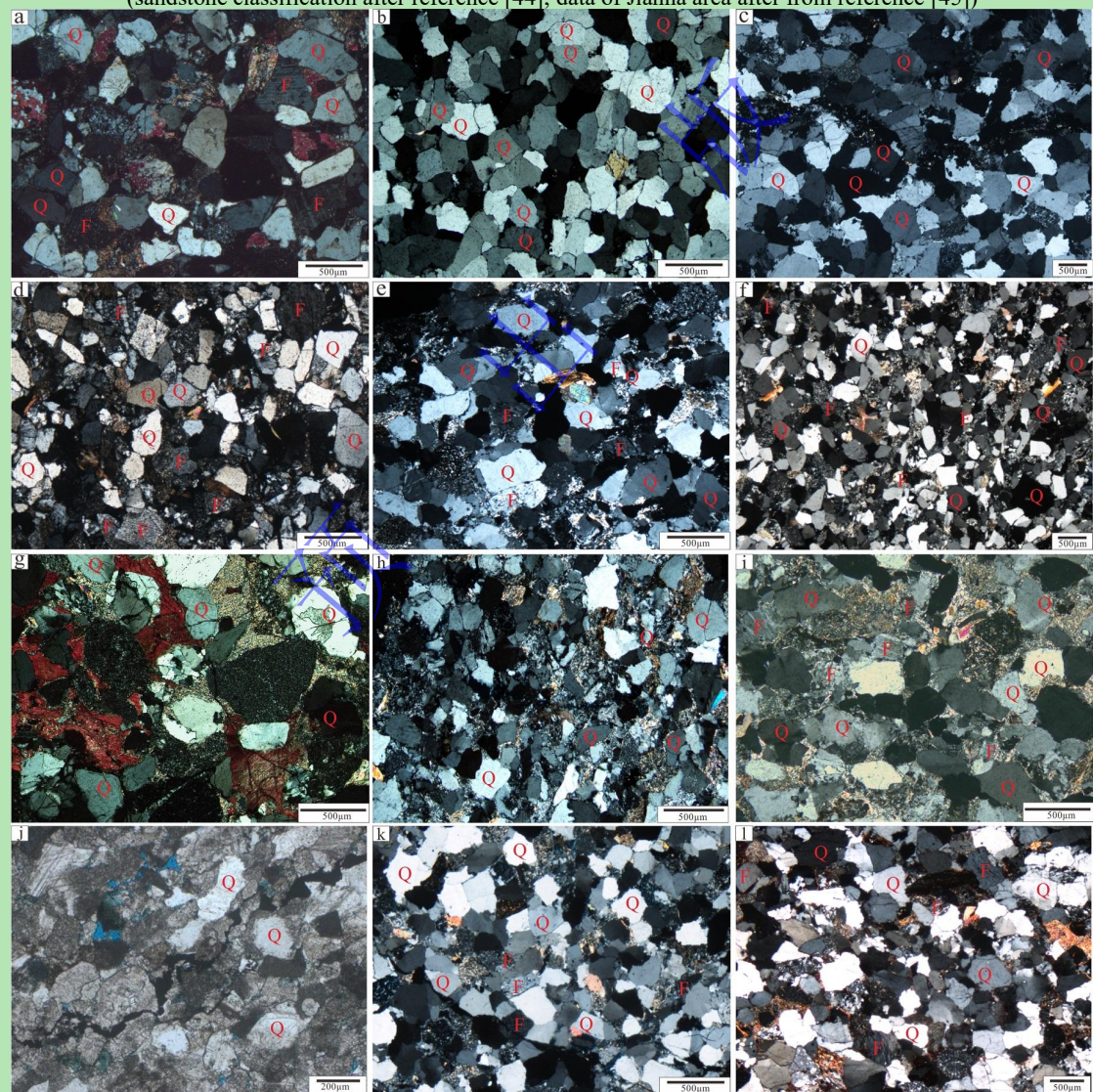


图4 四川盆地须二段和须四段致密砂岩储层典型样品镜下特征

(a) 中粒长石岩屑砂岩, 元陆 6 井, 4 463.35 m, 须二段, 正交偏光; (b) 细—中粒石英砂岩, 马 10 井, 3 912.22 m, 须二段, 正交偏光; (c) 粗粒岩屑石英砂岩, 新 11 井, 4 931.63 m, 须二段, 正交偏光; (d) 细—中粒岩屑长石砂岩, 德阳 1 井, 5 554.30 m, 须二段, 正交偏光; (e) 中粒长石岩屑砂岩, 盐 2 井, 3 070.00 m, 须二段, 正交偏光; (f) 粗—中粒长石岩屑砂岩, 潼

南 6 井, 2 255.60 m, 须二段, 正交偏光; (g) 中—粗粒岩屑砂岩, 元坝 271 井, 4 020.00 m, 须四段, 正交偏光; (h) 细—中粒岩屑砂岩, 普陆 1 井, 3 271.80 m, 须四段, 正交偏光; (i) 粗—中粒长石岩屑砂岩, 元陆 176 井, 4 741.87 m, 须四段, 正交偏光; (j) 细—中粒岩屑 (钙屑) 砂岩, 川丰 563 井, 3 741.96 m, 须四段, 单偏光; (k) 粗—中粒长石岩屑砂岩, 大 6 井, 3 419.40 m, 须四段, 正交偏光; (l) 粗—中粒长石岩屑砂岩, 包 36 井, 2 128.97 m, 须四段, 正交偏光。Q. 石英; F. 长石

Fig.4 Photomicrographs of typical tight sandstone reservoir samples from Members T_{3x^2} and T_{3x^4} , Sichuan Basin

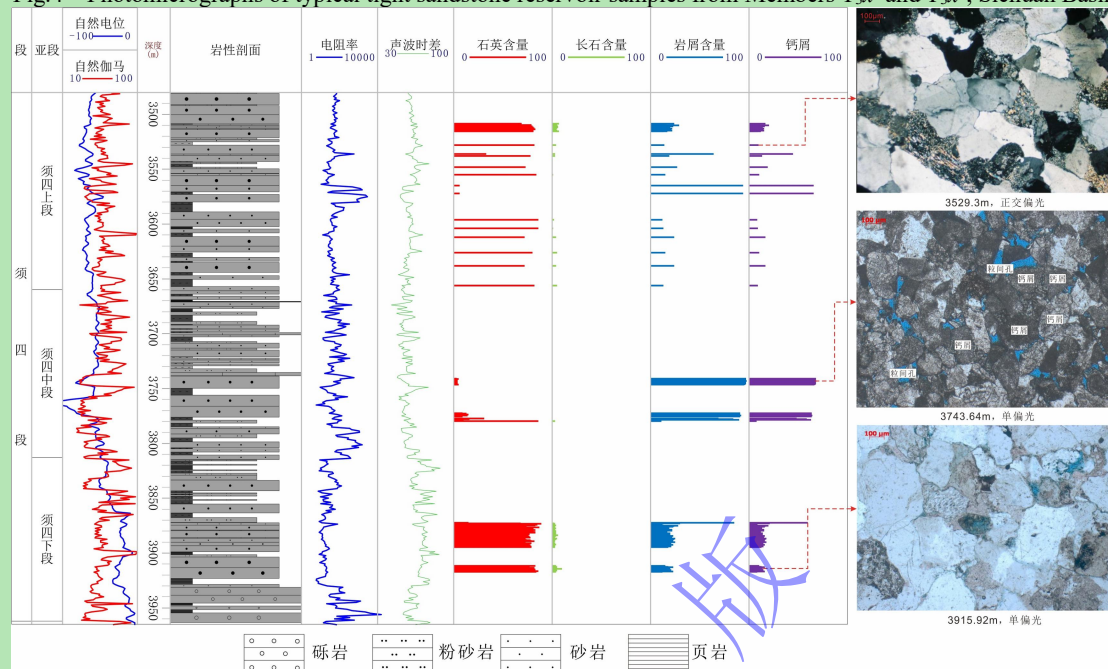


图 5 川西坳陷川丰 563 井须四段砂岩岩石组纵向分布特征及典型镜下薄片特征

Fig.5 Vertical distribution of rock components and representative thin-section features of Member T_{3x^4} sandstone in Well Chuanfeng 563, Western Sichuan Depression

3.2 砂岩物性与储集空间特征

须家河组沉积以来, 受盆地各区域多期构造活动的影响, 造就了须家河组现今埋藏深度的极大差异 (图 6)。在川西坳陷、川北元坝、通南巴地区, 须二段储层埋藏深度最大可达 5 500~6 000 m, 而向东、向南, 埋藏深度呈现逐渐变浅的趋势。据埋藏深度与孔隙度投点图 (图 6a~d) 可知, 须家河组砂岩储层孔隙度整体随着埋藏深度的加大而呈现明显的降低的趋势, 其中须四段表现更为明显。埋深与渗透率的投点图表明, 须二段储层渗透率随着埋深加大没有显著增减规律, 而须四段储层表现出随埋深加大而降低的趋势。

四川盆地须家河组相对高孔、高渗的储层主要分布在川南、川中和川西坳陷等地区, 以及元坝西和川西南须二段。须二段储层孔隙度在川西坳陷 5 000~5 500 m 区间仍然存在部分储层孔隙度超过 10% 的样品, 铸体薄片表明这与粒间孔大量发育有关 (图 7a), 同时川西坳陷须二段储层的渗透率也较高, 甚至不差于埋藏深度仅 2 000 m 左右的川南和川中地区。这一方面得益于川西坳陷部分致密砂岩储层中微裂缝较为发育 (图 7b), 孔隙度—渗透率投点可见川西坳陷须家河组的样品受裂缝影响不小; 另外, 川西坳陷须二段粒间孔大量发育的情形下孔喉结构较好, 有助于渗透率的提高。川中和川南地区的相对高渗的致密砂岩储层归因于储层孔隙度较高, 孔—渗投点 (图 6e, f) 表明川中和川南地区储层孔—渗关系主要

表现为较好的线性关系，指示裂缝影响较小；储集空间类型复杂多样，发育粒间孔、粒内溶孔等（图 7c~e）。川西坳陷须四段非均质性较强，钙屑砂岩受多期碳酸盐胶结影响，钙质致密层较发育，但在部分层段仍发育高孔段，形成了以粒间孔、晶间孔为主的储层（图 7f）；而须四段岩屑砂岩类受成岩早期大气淡水淋滤溶蚀影响，粒内溶孔和高岭石晶间孔较为发育（图 7g）。整体看来，须家河组孔隙型储层发育在川西坳陷、川南和川中的须二和须四段，在元坝西（图 7h）和川西南须二段也较为发育，而在普光、巴中、通南巴（图 7i）等区域主要发育裂缝型及孔隙—裂缝型储层。

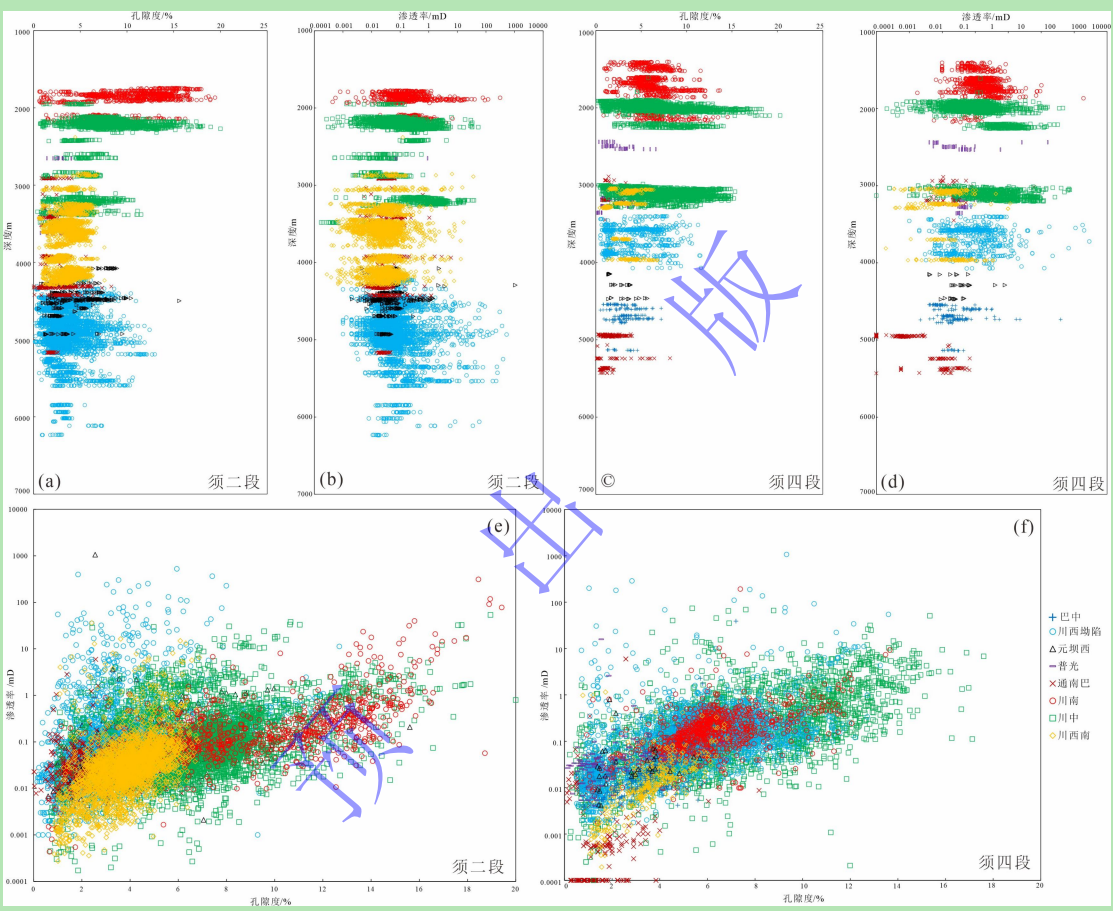


图 6 四川盆地须家河组致密砂岩储层孔隙度—渗透率投点与纵向分布特征
(a) 须二段孔隙度与深度投点图；(b) 须二段渗透率与深度投点图；(c) 须四段孔隙度与深度投点图；(d) 须四段渗透率与深度投点图；(e) 须二段储层孔隙度—渗透率投点图；(f) 须四段储层孔隙度—渗透率投点图
Fig.6 Cross-plot and vertical distribution of porosity-permeability in tight sandstone reservoirs, Xujiahe Formation, Sichuan Basin

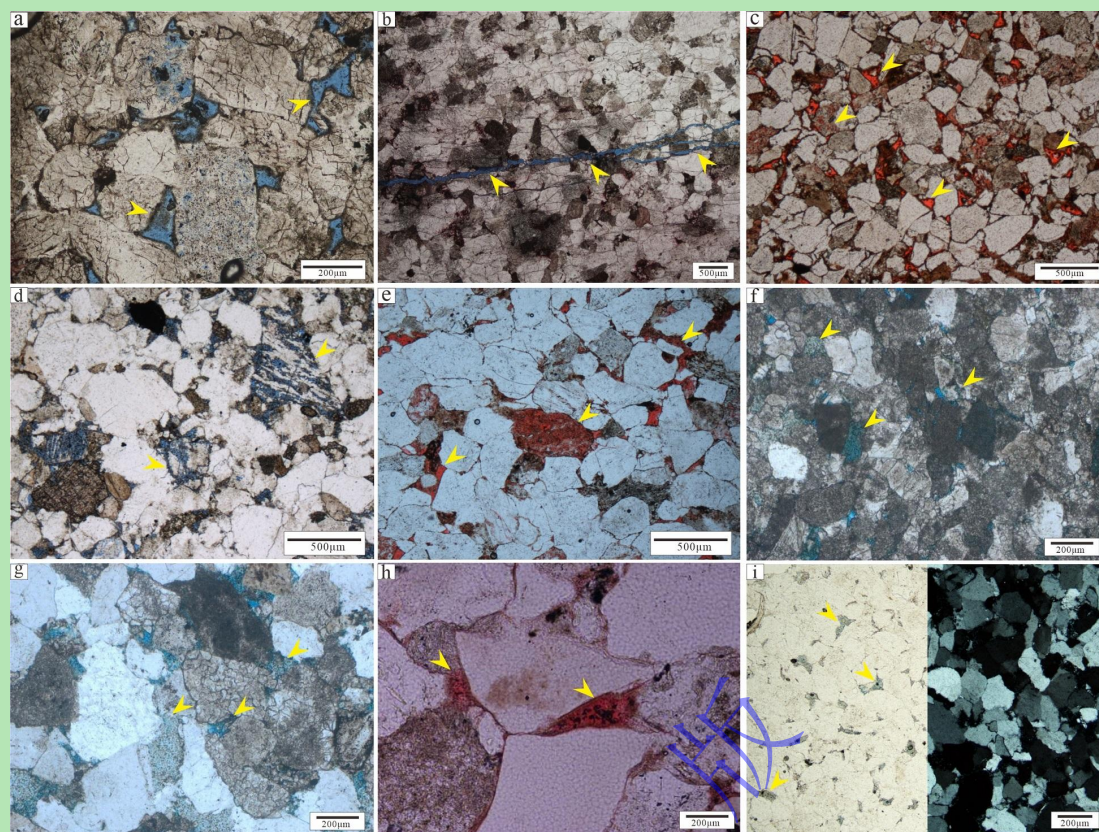


图7 四川盆地须家河组致密砂岩储层典型储集空间特征

(a) 原生粒间孔发育, 孔隙边缘见绿泥石包膜, 新场7井, 须二段, 5 186.76 m, 蓝色铸体, 单偏光; (b) 微裂缝切穿颗粒, 川高561, 须二段, 4 942.00 m, 蓝色铸体, 单偏光; (c) 原生粒间孔发育, 合川1, 须二段, 2 153.28 m, 红色铸体, 单偏光; (d) 长石粒内溶孔发育, 威东2井, 须二段, 2 078.40 m, 蓝色铸体, 单偏光; (e) 原生粒间孔与长石粒内溶孔发育, 包36井, 须四段, 2 141.18 m, 红色铸体, 单偏光; (f) 粒间孔和高岭石晶间孔发育, 川丰563井, 须四段, 3 741.96 m, 蓝色铸体, 单偏光; (g) 粒间孔和高岭石晶间孔发育, 川绵39井, 须四段, 3 016.60 m, 蓝色铸体, 单偏光; (h) 原生粒间孔发育, 颗粒边缘见绿泥石包膜, 元坝204井, 须二段, 4 634.20 m, 红色铸体, 单偏光; (i) 细粒石英砂岩中粒间孔发育, 马10井, 须二段, 3 930.00 m, 单偏光(左)正交偏光(右), 蓝色铸体

Fig.7 Photomicrographs of typical reservoir pore space properties in tight sandstone reservoirs, Xujiache Formation, Sichuan Basin

4 孔隙形成机制

一般来说, 碎屑岩的孔隙度、渗透率随着埋藏深度的增加, 整体呈现出降低的趋势, 在埋藏深度越大的砂岩中, 物性较好的储层难以存在^[46-47]。四川盆地须家河组现今的埋藏深度从1 000 m至6 000 m不等, 在不同地区、不同深度及不同层段均发育高孔渗的优质储层段, 优质储层的形成机理存在显著差异。

4.1 原生孔隙保存机制

砂岩的原生孔隙形成于沉积初始时, 初始原生孔隙度的大小与砂岩自身的岩矿结构息息相关^[11], 进入埋藏阶段后, 因压实作用和胶结作用而发生了不同程度的损失。针对砂岩原生孔隙的保存机制, 前人主要提出了地层超压^[47-49]、烃类充注^[50-51]、成岩早期胶结作用^[46,52-54]等因素, 本研究主要从岩矿组成出发, 探讨对原生孔隙保存的影响。

4.1.1 高刚性颗粒砂岩

碎屑颗粒中石英、长石和岩浆岩岩屑等刚性颗粒在埋藏成岩过程中，强抗压实作用有助于原生粒间孔隙的保存^[46]，而塑性岩屑（中—低级变质岩岩屑、沉积岩岩屑等）会因强压实作用而弯曲变形、堵塞孔隙。四川盆地须家河组中须二段相比须四段更富石英，而在区域上，川中和川西坳陷石英含量更高。川西坳陷须二段储层中石英含量与储层孔隙度呈现较弱的正相关性（图 8），在石英含量低于 50% 的砂岩中，优质储层难以发育；但是随着石英含量的升高，储层孔隙度并没有完全呈增加的趋势，这也说明了优质储层也受到其他因素的影响。石英虽然有助于原生孔隙的保存（图 9a），但当石英砂岩或者岩屑石英砂岩进入成岩阶段中—晚期时，压溶作用会造成石英颗粒挤压接触处发生溶解而形成硅质胶结从而堵塞粒间孔隙（图 8b，图 9b，c），这个过程受压力和温度控制，因此在深埋藏砂岩中较为普遍。

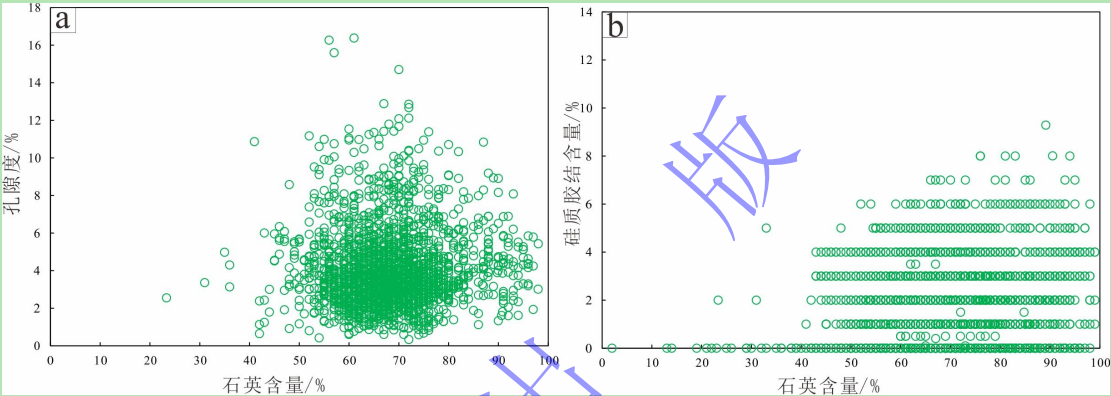


图 8 川西坳陷须家河组石英碎屑颗粒含量与孔隙度（a）、硅质胶结（b）关系图
Fig.8 Cross-plots of Xujiache Formation sandstones, Western Sichuan Depression: (a) quartz clast content vs. porosity; (b) quartz clast content vs. silica cementation intensity

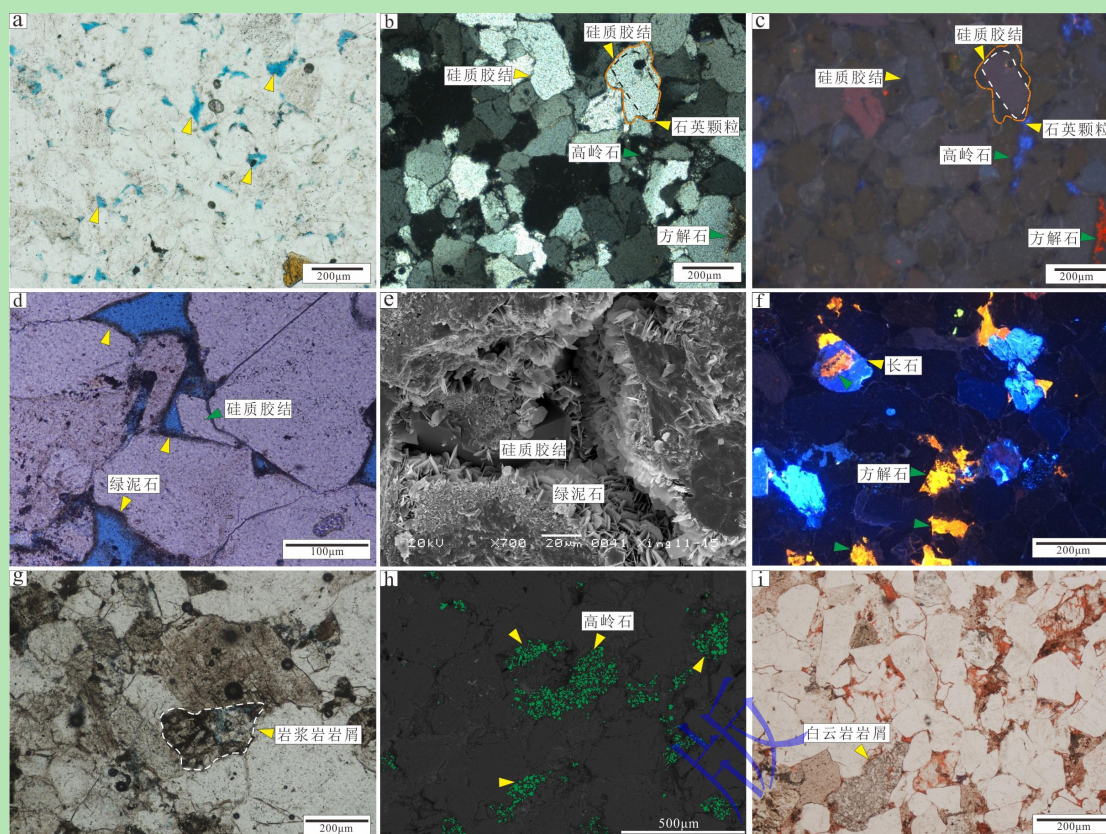


图9 四川盆地须家河组致密砂岩典型微观成岩特征

(a) 细粒石英砂岩, 粒间孔发育, 马 10, 3 933.97 m, 须二段, 单偏光; (b, c) 中—细粒石英砂岩, 石英颗粒边缘次生加大显著, 次生加大在阴极发光照射下不发光, 高岭石发蓝光, 方解石发红光, 元坝 204, 4 633.40 m, 须二段, b 为正交偏光, c 为阴极反光; (d) 颗粒边缘见绿泥石包膜, 粒间孔发育, 硅质胶结呈粒间孔隙充填, 形成期次晚于绿泥石包膜, 合川 7, 2 191.18 m, 须二段, 单偏光; (e) 绿泥石包膜和粒间孔发育, 硅质胶结充填粒间孔, 新 11, 5 017.30 m, 须二段, 二次电子图像; (f) 长石溶解后被方解石充填, 金沙 2, 3 265.9 m, 须四段, 阴极发光; g. 岩浆岩岩屑溶蚀形成粒内溶孔, 新 10, 4 884.85 m, 须二段, 单偏光; (h) 长石溶解后形成高岭石, 呈斑块状分布, 绿色为高岭石, 川绵 39, 3 108.80 m, 背散射图像; (i) 白云岩岩屑粒内溶孔, 川丰 125, 3 582.17 m, 须四段, 单偏光

Fig.9 Photomicrographs of typical microscopic diagenetic features in tight sandstone, Xujiache Formation, Sichuan Basin

4.1.2 绿泥石包膜

绿泥石包膜, 又称为环边绿泥石, 是含铁的层状铝硅酸盐矿物, 是形成于同生成岩—早成岩阶段、包裹于颗粒表面生长的自生绿泥石^[53,55] (图 9d, e)。绿泥石包膜的形成主要受控于沉积相, 形成于水动力条件强、碱性且有着丰富铁、镁离子来源的环境^[53], 另外绿泥石包膜的发育也受海/湖平面上升的影响^[55]。碎屑岩中自生绿泥石的铁离子来源包括有富铁岩屑的蚀变排出的铁离子^[46,56]; 河流汇入海洋时, 河水中铁离子形成絮状沉淀, 成为绿泥石环边胶结物的来源^[57]; 泥岩排出的流体富含铁、镁离子^[58]。岩石组分及沉积相带是自生绿泥石包膜形成的关键。绿泥石包膜在须家河组致密砂岩中分布广泛, 从分布层段来说, 绿泥石包膜含量在各地段的须二段和须四段均有发育, 但在须二段含量相对更高 (图 10a)、分布范围更广; 从分布规律来说, 绿泥石的含量与长石、岩浆岩岩屑等碎屑颗粒呈明显的正相关性 (图 10b), 表现出一定程度的物源指示意义。

对于绿泥石包膜是否有助于储层孔隙的发育, 历来观点与争议较多。Bloch *et al.*^[45]、黄

思静等^[53]认为形成于早成岩期的绿泥石包膜对于储层孔隙是有利的, 绿泥石包膜可以提高碎屑颗粒的抗压实能力, 同时绿泥石包膜的形成能够抑制石英次生加大边的形成。刘林玉等^[58]、Xiang *et al.*^[59]、Hong *et al.*^[60]则认为绿泥石包膜对于储层物性有着负面的影响。这个观点在四川盆地沙溪庙组绿泥石包膜对储层物性的研究中也得到了证实^[61], 当绿泥石包膜的厚度达到一定程度时, 会对储层孔隙结构产生不利的影响, 在孔隙度相当的条件, 渗透率会显著降低。对于须家河组来说, 绿泥石包膜的平均厚度小于 15 μm (图 9d), 与储层孔隙度具有明显的正相关性 (图 10c), 是须家河组储层在深埋藏条件下原生孔隙得以保存的重要机制。

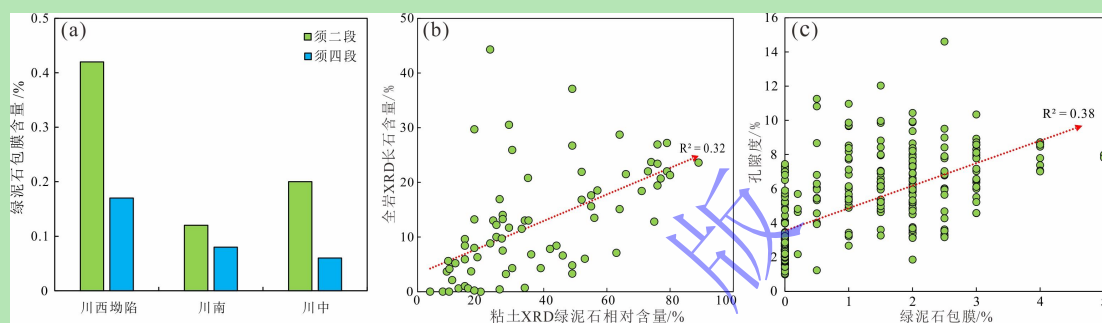


图 10 (a) 须二段和须四段绿泥石含量直方图; (b) 川西一川中地区绿泥石与长石含量交会图; (c) 绿泥石包膜与孔隙度交会图

Fig. 10 (a) histograms of chlorite content in the Members T_{3x^2} and T_{3x^4} ; (b) cross-plots of chlorite vs. feldspar content in western-central Sichuan areas; (c) chlorite coating vs. porosity

4.2 次生孔隙形成机制

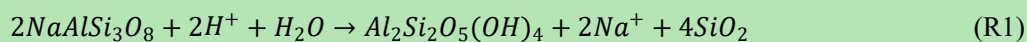
溶蚀作用形成的次生孔隙是深埋藏砂岩储层孔隙重要的组成部分^[62-64]。溶蚀作用主要作用于相对不稳定的矿物, 主要包括长石及岩浆岩岩屑和碳酸盐岩屑及胶结物。

4.2.1 长石及岩浆岩岩屑

长石及岩浆岩岩屑等铝硅酸盐矿物溶蚀形成的粒内溶孔、铸膜孔是须家河组致密砂岩储层最主要的储集空间之一，在须二段和须四段分布广泛。据溶蚀作用酸性流体性质可分为有机酸、大气淡水和深部流体三类。

1) 有机酸

有机酸溶蚀是深埋藏条件下碎屑岩储层次生溶孔形成的重要因素^[62-65]。当古地温温度达到 70 °C~80 °C 时, 烃源岩中干酪根热演化生成的有机酸及脱羧形成的 CO₂ 可溶解长石和岩浆岩岩屑^[63,66-68]。以钠长石的溶蚀为例, 反应式为^[68]:



钠长石

高岭石

须家河组为自生自储型储层，须一段、须三段和须五段均是以泥岩、粉砂岩为主的煤系烃源岩层段，具备干酪根热演化形成有机酸的条件。结合四川盆地偏低的地温梯度（20~25 °C/km^[69]），当埋藏深度达到 3 000 m 时，烃源岩有机质成熟并释放有机酸进入须二和须四等储层段，造成长石等不稳定矿物的溶解，形成粒内溶孔（图 7a, d, e、图 9f, g、图 11）。使用包裹体测温 and 激光拉曼成分测试可观察到在川西坳陷须四段储层的流体包裹体中 CH₄ 和 CO₂ 的存在（图 12），且含 CH₄ 包裹体的温度分布区间介于 65.8 °C~130.8 °C^[15]，处于有机酸大量成熟形成阶段。有机酸形成的粒内溶孔是须家河组最为主要的储集空间类型。

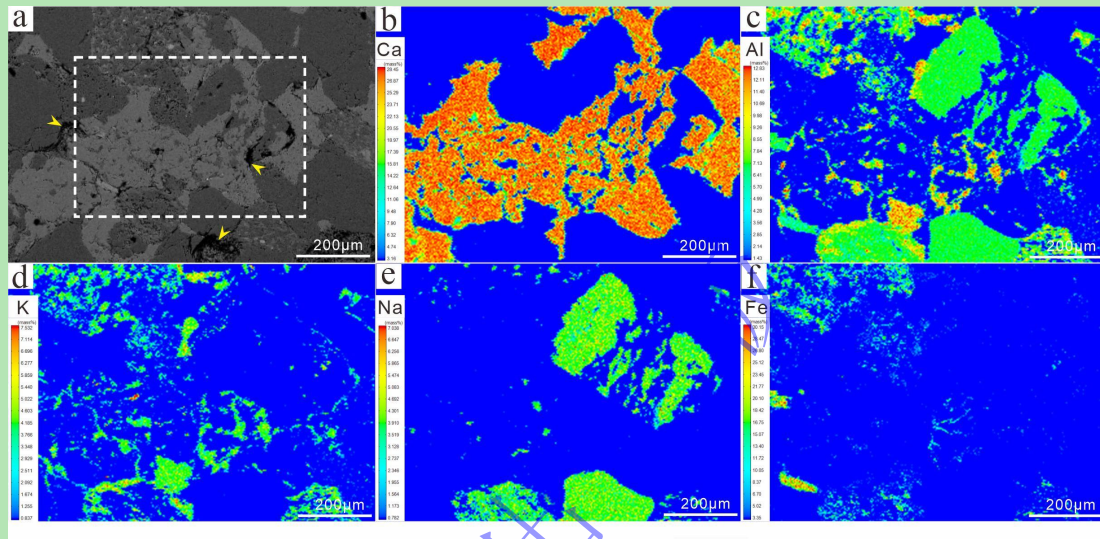


图 11 背散射图像 (a) 和 Ca、Al、K、Na、Fe 元素叠加分布图 (b~f)，长石溶解后形成粒内溶孔，后被方解石胶结物充填，剩余少量粒内溶孔 DY1 井，4 194.72 m，须四段

Fig.11 Intragranular dissolution pores formed by feldspar dissolution and subsequent calcite cementation with residual pores, Well DY1, 4 194.72 m, Member T_{3x}⁴: (a) backscattered electron (BSE) image; (b-f) Ca-Al-K-Na-Fe element distribution maps

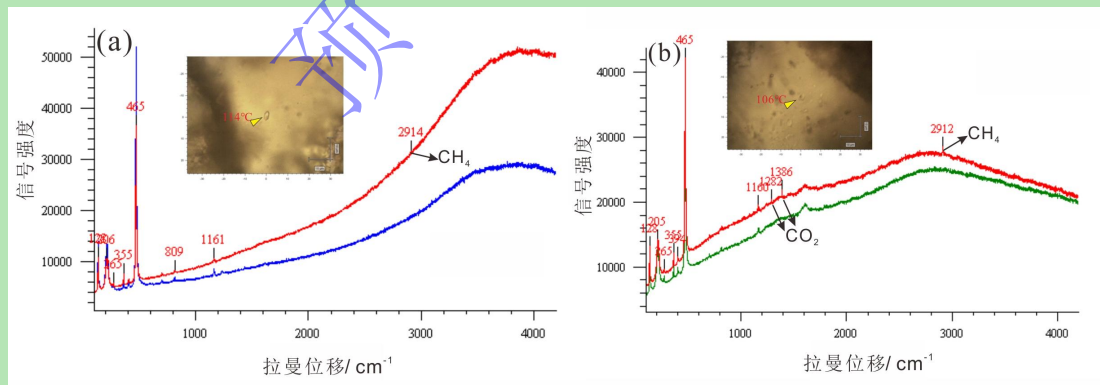


图 12 (a) 拉曼衍射曲线及包裹体显微照片，2 914 峰值指示 CH₄，川合 139 井，3 781.79 m，须四段；(b) 拉曼衍射曲线及包裹体显微照片，2 914 峰值指示 CH₄，1 282/1 386 峰值指示 CO₂，新场 31 井，3 740.38 m，须四段

Fig.12 Raman spectra and photomicrographs of fluid inclusions, Member T_{3x}⁴: (a) 2 914 cm⁻¹ peak indicates CH₄, well Chuanhe 139, 3 781.79 m; (b) 2 914 cm⁻¹ peak (CH₄) and 1 282/1 386 cm⁻¹ peaks (CO₂), well Xinchang 31, 3 740.38 m, Member T_{3x}⁴

2) 大气淡水

构造抬升引起的大气淡水的淋滤使得地层暴露在大气淡水环境中，弱酸性的大气淡水进

入储层造成不稳定矿物的溶解，形成次生溶孔^[66,70]。大气淡水与孔隙成岩流体混合形成了低 K^+/H^+ 比值的弱酸性流体，引起了长石等矿物的溶解，造成了早期自生石英胶结物的沉淀^[66,71]。因为此时储层处于早成岩阶段，成岩系统处于开放—半开放状态，溶蚀的产物，如硅质、钠或钾等离子（取决于溶解长石类型）随着成岩流体迁移，促使反应持续地进行^[71]，造成砂岩中的长石因溶蚀作用而几乎完全消失，同时沉淀了大量的高岭石（图 9h），且形成了大量的长石粒内溶孔和高岭石晶间孔。晚三叠世—侏罗纪，印支运动造成四川盆地西部隆升，在此过程中，大气水沿地表下渗，此时川西地区的须四段上部地层埋深小于 1 500 m，成为大气水渗入并影响的主要层段，前期关于川西坳陷须四段砂岩的低温石英包裹体（ $<70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的研究能够佐证^[72]。大气淡水对须家河组储层的影响主要分布在川西地区的须四段上部、顶部和埋藏深度较浅的区域。

3) 沿缝溶蚀成孔效应

在川西坳陷大邑和新场、川东北的通江—马路背地区及川中—川西过渡带局部地区等多个区块观察到裂缝的发育与溶蚀孔隙具有较高的耦合度现象（图 13）。在岩心上可观察到大量的裂缝，主要以低角度缝和平缝为主（图 13a, c），薄片可观察到切穿颗粒的微裂缝与粒内溶孔相伴生，粒内溶孔中可观察到溶蚀残余矿物（石英、高岭石）的存在，指示反应时成岩系统封闭，反应生成物未带出系统。部分裂缝宽度可达 200~500 μm （图 13d），裂缝中部分充填高岭石，在裂缝边缘可见自形—半自形粒状硅质胶结生长，推测裂缝开启后具较高温度的深部流体进入储层、沿裂缝溶蚀了邻近不稳定矿物。须家河组的沿缝溶蚀成孔效应主要分布在须二段中、下部，且与裂缝发育程度有密切联系。

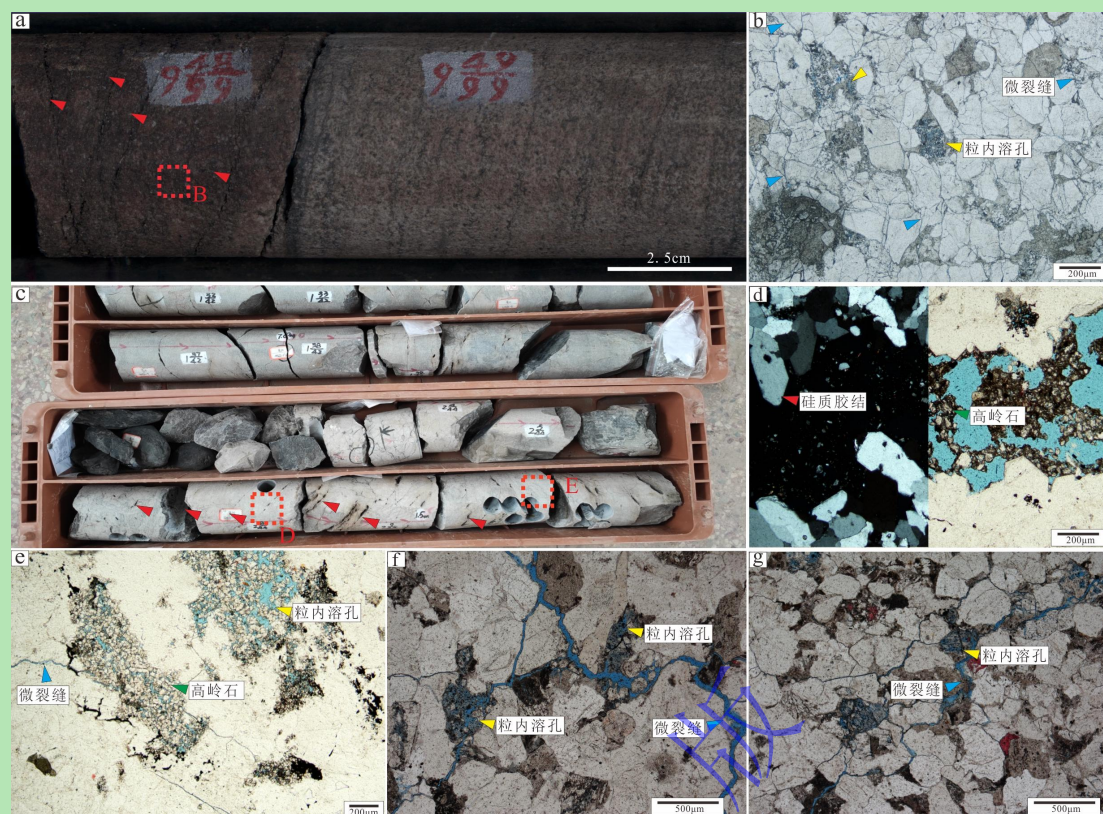


图 13 须家河组沿缝溶蚀现象特征

(a) 灰白—灰色中粒砂岩，见水平裂缝，大邑 4，5 516.22~5 516.40 m，须二段；(b) 中粒长石岩屑砂岩，见多条微裂缝切穿颗粒和粒内溶孔，大邑 4，5 516.24 m，须二段，单偏光；c. 灰白色砂岩，低角度缝发育，部分被充填，马 10 井，3 924.67 m 至 3 926.70 m，须二段；(d) 细粒石英砂岩，见高岭石和硅质充填裂缝，马 10 井，3 925.82 m，正交偏光（左）、单偏光（右）；(e) 微裂缝与粒内溶孔，粒内溶孔充填高岭石，马 10 井，3 926.27 m，单偏光；(f) 微裂缝与粒内溶孔，中台 1 井，3 673.10 m，单偏光；(g) 微裂缝与粒内溶孔，见少量方解石充填，中台 1 井，3 665.93 m，单偏光

Fig.13 Characteristics of dissolution along fractures in the Xujiache Formation

4.2.2 碳酸盐岩屑

须家河组致密砂岩储层碳酸盐矿物的溶解主要表现为碳酸盐岩屑溶蚀形成的粒内溶孔（图 9i），碳酸盐胶结物溶蚀少见。碳酸盐岩屑粒内溶孔主要见于富碳酸盐岩屑的砂岩储层中，在川西地区须四段砂岩中最为常见。相比长石和岩浆岩岩屑的溶蚀现象来说，碳酸盐岩屑的溶蚀程度普遍偏低，多为颗粒内部及边缘的局部溶蚀（图 9i）。

5 差异成岩演化及优质储层形成机理

综合四川盆地各区块、各层段的埋深、岩石学特征、储集空间特征及相应的优质储层形成机理等信息，主要储层特征参数统计如表 1 所示。整体来说，四川盆地须家河组虽然现今埋深存在较大差异，但最大埋深下的古地温均达到了有机酸形成的温度，且须一、须三段烃源岩分布广泛，在纵向上与须二和须四段储层形成“下生上储”的源储组合，因此对于绝大部分储层来说有机酸溶蚀长石及不稳定岩屑是主要的成储机制。盆地东部、中部等地区，受

大巴山、雪峰古陆及南部的黔中隆起等多物源的影响（图 14），表现出明显的混源特征，储层砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩等为主，碎屑矿物中较富长石，且因距离物源较远，形成了远物源的三角洲沉积体系。碎屑物质的搬运距离较远，结构成熟度较高，为绿泥石包膜和溶蚀作用等保持性/增孔成岩因素提供了物质基础，形成了现今以粒间孔和粒内溶孔兼存的基质孔隙型储层。盆地北部的通江—马路背地区，储层砂岩的物源为米仓山造山带，受此影响形成了贫长石、以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主的砂岩，形成了以粒内溶孔为主的储层；而在该区须二段下部滩坝沉积的石英砂岩发育粒间孔。盆地西部的川西坳陷和川东北的元坝等区块则是经历了物源影响的转换过程，须二段沉积期龙门山物源以提供富长石的硅质碎屑为特征，在川西坳陷和元坝西部形成了长石岩屑砂岩乃至岩屑长石砂岩，且绿泥石包膜较为发育，因此形成了粒间孔和粒内溶孔并存的储层。至须四段沉积期，龙门山提供的物源转换为以贫长石为特征，形成了岩屑砂岩、钙屑砂岩等储层，元坝和川西坳陷的岩屑砂岩储层中岩屑与少量的长石颗粒溶蚀形成粒内溶孔为主的储层，而钙屑砂岩因碳酸盐岩屑相对较强的抗压实能力，形成了以粒间孔为主的储层。另外，在川西坳陷的须四段上部、顶部储层中，受淡水淋滤作用影响，长石含量进一步降低、高岭石较为发育。在川西坳陷大邑、新场地区和川东北通江—马路背构造高部位等断裂较发育区，受深部流体的影响，发育裂缝的同时形成了大量的次生溶蚀孔隙，沿缝溶蚀成孔效应有效地提升了储层质量。

表 1 四川盆地须家河组致密砂岩储层特征参数对比
Table 1 Comparison of key parameters for tight sandstone reservoirs in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin

源区	地区	层段	埋藏深度/m	砂岩类型	储集空间特征	关键保持性/增孔因素
龙门山物源	川东北元坝地区	须四	4 000~4 500	岩屑砂岩	粒内溶孔	溶蚀作用
		须二	4 000~5 000	长石岩屑砂岩、岩屑砂岩	粒间孔、粒内溶孔	早期绿泥石包膜、溶蚀作用
	川西坳陷	须四	3 000~4 000	岩屑砂岩、钙屑砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	钙屑砂岩：粒间孔、晶间孔；其他砂岩：粒内溶孔、晶间孔	溶蚀作用（碳酸盐岩屑与长石）
		须二	4 000~6 000	长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、石英砂岩	粒间孔、粒内溶孔和微裂缝	高石英含量、早期绿泥石包膜、溶蚀作用、沿缝溶蚀作用
米仓山物源	川东北通江—马路背地区	须四	2 800~5 500	岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	粒内溶孔	溶蚀作用
		须二	2 900~5 200	岩屑石英砂岩、岩屑砂岩、石英砂岩	粒间孔、粒内溶孔、微裂缝	高石英含量、溶蚀作用、沿缝溶蚀作用
混源（大巴山、雪峰古陆等）	川中地区	须四	1 800~3 200	长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩	粒间孔、粒内溶孔	早期绿泥石包膜、溶蚀作用
		须二	2 000~3 400	长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩		
	川南地区	须四	1 500~2 200	长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩		
		须二	1 800~2 200	长石岩屑砂岩、岩屑砂岩		
	川西南地区	须四	3 000~4 000	长石岩屑砂岩		
		须二	3 000~4 400	长石岩屑砂岩		
	川东北普光地区	须四	2 400~2 600	岩屑砂岩		
		须	2 600~3 000	岩屑砂岩、长石岩屑砂岩		

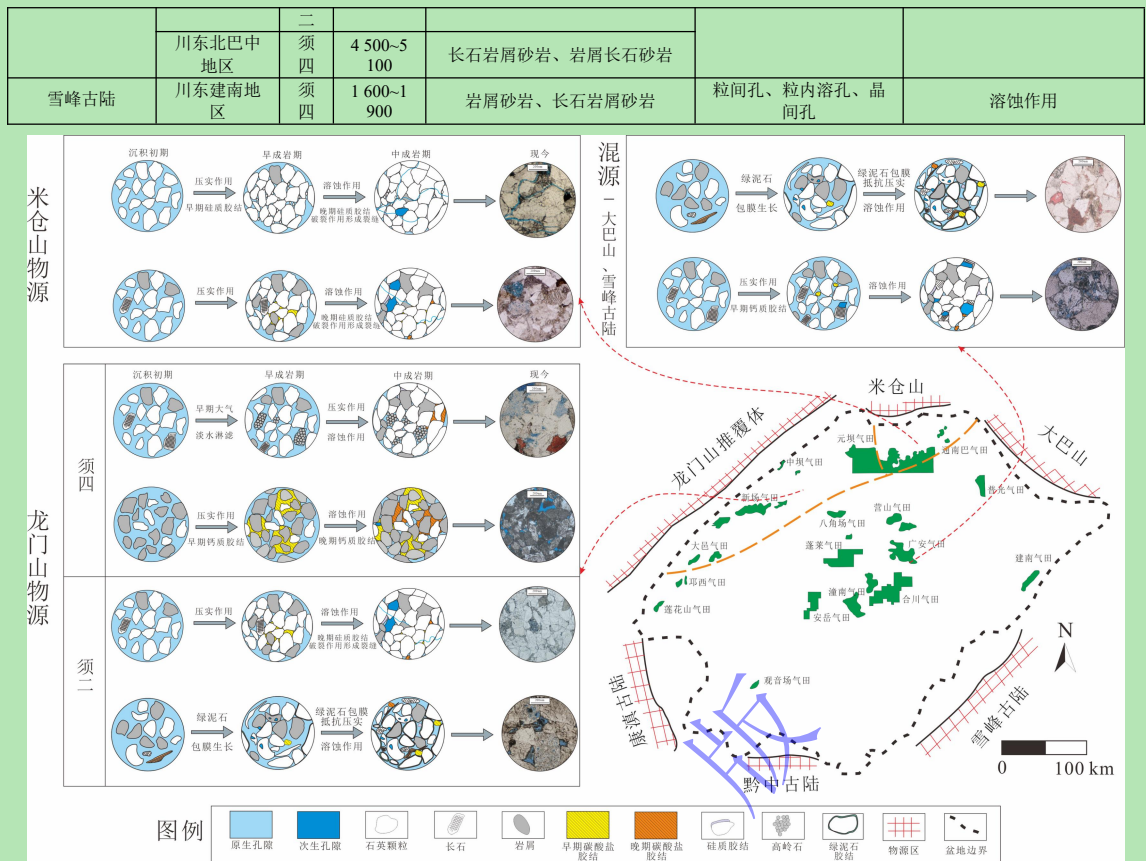


图 14 四川盆地须家河组不同物源影响下优质储层形成机理

Fig.14 Provenance influences on formation mechanisms of high-quality reservoirs in the Xujiache Formation, Sichuan Basin

综上,从盆地尺度来说,多物源背景通过控制原始岩石组构差异,叠加埋藏—抬升过程、构造裂缝发育特征、水—岩流体反应等诸多因素的影响,使得四川盆地须家河组砂岩形成了如今差异显著的储层特征,不同区块、不同层段的成储机理差异明显。川中、川南等受大巴山—雪峰古陆物源影响的混源地区,由于处于盆地内部,构造活动相对较弱,形成了以基质孔隙型为主的储层,而川北通江—马路背地区和川西坳陷新场、大邑构造带等近物源区则是形成了裂缝—孔隙型的复合型储层。

6 结论

(1) 物源差异导致四川盆地须家河组 砂岩组分差异显著,须二段以岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主,须四段砂岩以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,岩屑含量显著上升。受龙门山造山带由阶段性隆升影响,靠近盆地西缘的川东北元坝、通江—马路背等地区长石含量锐减。储层孔隙度随埋深增加而递减,但在局部埋深超过 5000 m 的区域,因微裂缝发育和粒间孔保存,仍存在孔隙度超过 10%的优质储层。川中、川南等浅埋藏区受裂缝影响较小,主要发育以粒间孔和粒内溶孔为主的孔隙型储层。

(2) 高刚性颗粒与早成岩期绿泥石包膜协同抑制压实作用与部分胶结作用, 使深埋藏条件(>5 000 m)下的须家河组砂岩原生粒间孔得以保存。次生孔隙发育具有时空分异性, 有机酸溶蚀主导深层粒内溶孔形成, 大气淡水淋滤与裂缝相关深部流体溶蚀分别控制浅层及构造带次生孔隙分布。

(3) 多物源背景通过控制原始岩石组构差异, 限定成岩作用类型与强度, 而构造活动通过埋藏—抬升过程调控流体运移与裂缝网络。在川中、川南等远物源的混源地区, 形成了以基质孔隙型为主的储层, 而在川北通江—马路背地区和川西坳陷新场、大邑构造带等近物源区则是形成了裂缝—孔隙型的复合型储层。

参考文献

- [1] 罗静兰, 李驰, 雷川, 等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与热点问题讨论[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1021-1040. [Luo Jinglan, Li Chi, Lei Chuan, et al. Discussion on research advances and hot issues in diagenesis of clastic-rock reservoirs[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(6): 1021-1040.]
- [2] 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.]
- [3] Higgs K E, Zwingmann H, Reyes A G, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(12): 1003-1025.
- [4] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2373-2383. [Lü Zhengxiang, Liu Sibing. Ultra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the Formation of relatively high-quality reservoir of Xujiache Group in western Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2373-2383.]
- [5] Dutton S P, Loucks R G. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in Lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultradeep (200-6700m) burial, Gulf of Mexico Basin, U.S.A.[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 69-81.
- [6] 胡文瑄. 盆地深部流体主要来源及判识标志研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 817-826. [Hu Wenxuan. Origin and indicators of deep-seated fluids in sedimentary basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 817-826.]
- [7] 操应长, 杨田, 宋明水, 等. 陆相断陷湖盆低渗透碎屑岩储层特征及相对优质储层成因: 以济阳凹陷东营凹陷古近系为例[J]. 石油学报, 2018, 39(7): 727-743. [Cao Yingchang, Yang Tian, Song Mingshui, et al. Characteristics of low-permeability clastic reservoirs and genesis of relatively high-quality reservoirs in the continental rift lake Basin: A case study of Paleogene in the Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7): 727-743.]
- [8] 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(增刊1): 87-98. [Luo Xiaorong, Wang Zhongnan, Lei Yuhong, 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(Suppl1): 87-98.]
- [9] 余瑜, 林良彪, 李真, 等. 致密砂岩碳酸盐矿物 SEM-CL 和 EPMA 矿物学表征及其成岩意义: 以川西坳陷须家河组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1468-1477. [Yu Yu, Lin Liangbiao, Li Zhen, et al. SEM-CL and EMPA Mineralogical characterization of authigenic calcite cement in tight gas sandstone and implications for diagenesis: Case study of Xujiache Formation in western Sichuan Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1468-1477.]
- [10] Morad S, Al-Ramadan K, 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, 94(8): 1267-1309.
- [11] Bjørlykke K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins[J]. Sedimentary Geology, 2014, 301: 1-14.
- [12] 李杪, 罗静兰, 赵会涛, 等. 不同岩性的成岩演化对致密砂岩储层储集性能的影响: 以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段天然气储层为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 97-106. [Li Miao, Luo Jinglan, Zhao Huitao, et al. Impact of the diagenetic evolution of different lithology on tight sandstone reservoir performance: A case study from He 8 natural gas reservoir of the Upper Paleozoic in eastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 97-106.]
- [13] 罗静兰, 罗晓容, 白玉彬, 等. 差异性成岩演化过程对储层致密化时序与孔隙演化的影响: 以鄂尔多斯盆地西南部长7致密浊积砂岩储层为例[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(1): 79-92. [Luo Jinglan, Luo Xiaorong, Bai Yubin, et al. Impact of differential diagenetic evolution on the chronological tightening and pore evolution of tight sandstone reservoirs: A case study from the Chang-7 tight turbidite sandstone reservoir in the southwestern Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1): 79-92.]
- [14] 张莉, 舒志国, 何生, 等. 川东建南地区须家河组储层特征及其差异演化过程[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3139-3156. [Zhang Li, Shu Zhiguo, He Sheng, et al. Reservoir characteristics and differential evolution process of Xujiahe Formation in Jiannan area, East Sichuan[J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3139-3156.]
- [15] 林良彪, 余瑜, 南红丽, 等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组四段储层致密化过程及其与油气成藏的耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 816-828. [Lin Liangbiao, Yu Yu, Nan Hongli, et al. Reservoir tightening process and its coupling relationship with hydrocarbon accumulation in the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 816-828.]
- [16] 文龙, 张本健, 金值民, 等. 四川盆地陆相全油气系统成藏序列与勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 997-1007. [Wen Long, Zhang Benjian, Jin Zhimin, et al. Accumulation sequence and exploration domain of continental whole petroleum system in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 997-1007.]
- [17] 郭彤楼, 熊亮, 杨映涛, 等. 从储层、烃源岩到输导层勘探: 以四川盆地须家河组致密砂岩气为例[J]. 石油学报, 2024, 45(7): 1078-1091. [Guo Tonglou, Xiong Liang, Yang Yingtao, et al. From reservoir, source to carrier beds exploration: A case study of tight sandstone gas in Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(7): 1078-1091.]
- [18] 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 1-11. [Zhang Daowei, Yang Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1-11.]
- [19] 蔡勋育, 邱桂强, 孙冬胜, 等. 中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 684-695. [Cai Xunyu, Qiu Guiqiang, Sun Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 684-695.]
- [20] 魏国齐, 杨威, 刘满仓, 等. 四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 1-12. [Wei Guoqi, Yang Wei, Liu Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 1-12.]
- [21] 杨雨, 文龙, 周刚, 等. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2045-2069. [Yang Yu, Wen Long, Zhou Gang, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2045-2069.]
- [22] 张小菊, 邓虎成, 伏美燕, 等. 多级界面约束下构型对储层非均质性控制作用: 以川西沙溪庙组曲流河为例[J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1384-1400. [Zhang Xiaoju, Deng Hucheng, Fu Meiyun, et al. Controls of architecture under the constraints of a multi-level interface on physical property heterogeneities from the meandering river of the Shaximiao Formation in western Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(4): 1384-1400.]
- [23] 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 765-783. [Zheng Herong, Liu Zhongqun, Xu Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 765-783.]

- [24] 王威. 川东北元坝地区须家河组第三段天然气富集主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 424-431. [Wang Wei. Main controlling factors of natural gas accumulation in the third member of Xujiahe Formation in Yuanba area, northeast Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(4): 424-431.]
- [25] 林良彪, 陈洪德, 翟常博, 等. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 511-517. [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhai Changbo, et al. Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(6): 511-517.]
- [26] 李智武, 宋天慧, 王自剑, 等. 川西—龙门山盆地系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 257-282. [Li Zhiwu, Song Tianhui, Wang Zijian, et al. Strike variation evolution of the Basin-mountain system in western Sichuan Longmenshan as recorded by deformation, exhumation and deposition and discussion on the Period of key structural transformation[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(3): 257-282.]
- [27] 陈洪德, 徐胜林, 林良彪, 等. 龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 622-630. [Chen Hongde, Xu Shenglin, Lin Liangbiao, et al. Segmental uplift of Longmenshan Orogen and sequence filling characteristic of western Sichuan foreland-like Basin, Later Triassic[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 622-630.]
- [28] 谢继容, 李国辉, 唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 1-3, 13. [Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai. Analysis on provenance-supply system of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(4): 1-3, 13.]
- [29] 施振生, 王秀芹, 吴长江. 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 618-627. [Shi Zhensheng, Wang Xiuqin, Wu Changjiang. The heavy minerals and provenances of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 618-627.]
- [30] 陈斌, 李勇, 王伟明, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 857-872. [Chen Bin, Li Yong, Wang Weiming, et al. The provenance and tectonic setting of Late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan Foreland Basin, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 857-872.]
- [31] 戴朝成, 郑荣才, 任军平, 等. 四川前陆盆地上三叠统须家河组物源区分析及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1085-1096. [Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Ren Junping, et al. Provenance analysis of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan foreland basin and its geology implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1085-1096.]
- [32] 苏加亮, 林良彪, 余瑜, 等. 川西新场地区上三叠统须家河组二、四段物源及储层特征差异对比研究[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1451-1467. [Su Jialiang, Lin Liangbiao, Yu Yu, et al. Comparative study on the provenance and reservoir characteristics of the second and fourth members of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, western Sichuan, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1451-1467.]
- [33] Lu G, Chen X W, Zou H, et al. Provenance of the first terrigenous sediments in the western Sichuan Basin during the Late Triassic: Implications for basin evolution from marine to continental[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 147: 105992.
- [34] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606. [He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 589-606.]
- [35] Hao F, Zou H Y, Gong Z S, et al. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation: Case studies from petroleum basins in China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(10): 1467-1498.
- [36] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-516. [Editorial Committee of Petroleum Geology of Sichuan Oilfield. Petroleum geology of China Vol 10 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-516.]
- [37] 刘树根, 童崇光, 罗志立, 等. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[J]. 天然气工业, 1995, 15(2): 11-15. [Liu Shugen, Tong Chongguang, Luo Zhili, et al. The Formation and evolution of Late Triassic foreland basin in West Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 11-15.]

- [38] Ma Y S, Guo X S, Guo T L, et al. The Puguang gas field: New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(5): 627-643.
- [39] 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 484-495. [Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(4): 484-495.]
- [40] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27. [Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, et al. Discussion on the theories of the hydrocarbon formation and distribution of the deep-seated marine carbonates in the Sichuan superimposed Basin, China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 15-27.]
- [41] 张健, 李国辉, 谢继容, 等. 四川盆地上三叠统划分对比研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 12-15. [Zhang Jian, Li Guohui, Xie Jirong, et al. Stratigraphic division and correlation of Upper Triassic in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 12-15.]
- [42] 林良彪, 陈洪德, 侯明才. 须家河组砂岩组分特征与龙门山推覆体的形成演化[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 28-30. [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Hou Mingcai. Characteristics of sandstone composition of Xujiahe Formation and evolution of Longmenshan thrust nappe[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 28-30.]
- [43] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1-274. [Zeng Yunfu, Xia Wenjie. Sedimentary petrology[M]. Bei Jing: Geological Publishing House, 1986: 1-274.]
- [44] 梁西文, 张莉. 川东建南地区须家河组储层特征及发育控制因素研究[J]. 华南地质, 2021, 37(1): 53-63. [Liang Xiwen, Zhang Li. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Xujiahe Formation in the Jiannan area, eastern Sichuan Basin[J]. South China Geology, 2021, 37(1): 53-63.]
- [45] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [46] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [47] Sborne M J, Swarbrick R E. Diagenesis in North Sea HPHT elastic reservoirs — consequences for porosity and overpressure prediction[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(4): 337-353.
- [48] 武文慧, 黄思静. 超压盆地中碎屑岩储集层的矿物岩石学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 258-262. [Wu Wenhui, Huang Sijing. Characters of petrology and mineralogy of reservoirs in overpressure basins[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(3): 258-262.]
- [49] Marchand A M E, Haszeldine R S, Smalley P C, et al. Evidence for reduced quartz-cementation rates in oil-filled sandstones[J]. Geology, 2001, 29(10): 915-918.
- [50] 康逊, 胡文瑄, 曹剑, 等. 钾长石和钠长石差异溶蚀与含烃类流体的关系: 以准噶尔盆地艾湖油田百口泉组为例[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1381-1393. [Kang Xun, Hu Wenxuan, Cao Jian, et al. Relationship between hydrocarbon bearing fluid and the differential corrosion of potash feldspar and albite: a case study of Baikouquan Formation in Aihu oilfield, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1381-1393.]
- [51] Aase N E, Bjorkum P A, Nadeau P H. The effect of grain-coating microquartz on preservation of reservoir porosity[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1654-1673.
- [52] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 273-281. [Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(3): 273-281.]
- [53] 黄思静, 黄培培, 王庆东, 等. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 7-13. [Huang Sijing, Huang Peipei, Wang Qingdong, et al. The significance of cementation in porosity preservation in deep-buried sandstones[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 7-13.]
- [54] Yu Y, Lin L B, Gao J. Formation mechanisms and sequence response of authigenic grain-coating chlorite: Evidence from the Upper

- Triassic Xujiahe Formation in the southern Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13(4): 657-668.
- [55] Billault V, Beaufort D, Baronnet A, et al. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs[J]. *Clay Minerals*, 2003, 38(3): 315-328.
- [56] Jeffry D G. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the Lower Vicksburg Formation, South Texas[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 27-36.
- [57] Hillier S, Fallick A E, Matter A. Origin of pore-lining chlorite in the Aeolian Rotliegend of northern Germany[J]. *Clay Minerals*, 1996, 31(2): 153-171.
- [58] 刘林玉, 曲志浩, 孙卫, 等. 新疆鄯善油田碎屑岩中的黏土矿物特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1998, 28(5): 443-446. [Liu Linyu, Qu Zhihao, Sun Wei, et al. Properties of clay mineral of clastic rock in Shanshan Oil Field, Xinjiang[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1998, 28(5): 443-446.]
- [59] Xiang F, Wang Y W, Feng Q, et al. Further research on chlorite rims in sandstones: Evidence from the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(7): 507.
- [60] Hong D D, Cao J, Guo X G, et al. Diagenetic fluid controls chemical compositions of authigenic chlorite in clastic reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 137: 105520.
- [61] 唐大海, 王旭丽, 曾琪, 等. 四川盆地西南部沙溪庙组致密砂岩低渗储层特征及形成机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 143-154. [Tang Dahai, Wang Xuli, Zeng Qi, et al. Reservoir characteristics and Formation mechanism of low permeability tight sandstone of Shaximiao Formation in southwest Sichuan Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(1): 143-154.]
- [62] 史基安, 晋慧娟, 薛莲花. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 67-75. [Shi Jian, Jin Huijuan, Xue Lianhua. Analysis on mechanism of feldspar dissolution and its influencing factors in feldspar-rich sandstone reservoir[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(3): 67-75.]
- [63] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220-223, 229. [Li Wenguo, Zhang Xiaopeng, Zhong Yumei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 220-223, 229.]
- [64] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506. [Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity Formation in clastic diagenesis: A case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, western Sichuan Depression[J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 498-506.]
- [65] Yuan G H, Cao Y C, Schulz H M, et al. A review of feldspar alteration and its geological significance in sedimentary basins: From shallow aquifers to deep hydrocarbon reservoirs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 114-140.
- [66] Ronald C S, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [67] 远光辉, 操应长, 蒯克来, 等. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 853-866. [Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 853-866.]
- [68] Giles M R, de Boer R B. Origin and significance of redistributional secondary porosity[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7(4): 378-397.
- [69] 刘一锋, 郑伦举, 邱楠生, 等. 川中古隆起超压分布与形成的地温场因素[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2380-2390. [Liu Yifeng, Zheng Lunju, Qiu Nansheng, et al. The effect of temperature on the overpressure distribution and Formation in the Central Paleo-Uplift of the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2380-2390.]
- [70] França A B, Araujo L M, Maynard J B, et al. Secondary porosity formed by deep meteoric leaching: Botucatu eolianite, southern South America[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(7): 1073-1082.
- [71] Yu Y, Lin L B, Li Z, et al. Source of quartz cement in tight gas sandstone: Evidence from the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin, SW China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110299.

- [72] 余瑜. 致密砂岩自生矿物形成机制及储层致密化机理研究: 以川西上三叠统须家河组四段为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 1-114. [Yu Yu. Formation of authigenic minerals and reservoir densification mechanism in tight sandstone: Case study from the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation, western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 1-114.]

Different diagenetic evolution and formation mechanisms of high-quality reservoirs in Xujiahe Formation tight sandstones, Sichuan Basin

LIN LiangBiao¹, YU Yu¹, ZHU HongQuan², ZHAI ChangBo³, WANG Wei⁴, YANG YingTao², LIU JunLong³, HUANG YanQing³, ZENG Tao⁴, LIU Ming⁴, QIU YuChao⁵, JIN ZhiMin⁵

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Southwest Oil & Gas Company, Chengdu 610041, China

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

4. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China

5. Exploration and Development Research Institute, Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil & Gas field Company, PetroChina Chengdu, Sichuan 610051, China

Abstract: [Objective] The Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin contains abundant tight sandstone gas resources, but its multi-provenance background has resulted in complex, diverse sandstone compositions. This study focuses on Members T₃x² and T₃x⁴ of the Xujiahe Formation, investigating the rock fabric, reservoir properties and pore formation mechanisms of high-quality reservoirs as influenced by a range of provenances, as well as the formation mechanisms of such reservoirs due to differences in their diagenetic evolution. The findings aim to provide a basis for exploring the gas potential of the tight sandstone in the Xujiahe Formation and to provide general insights for hydrocarbon exploration of tight sandstone sequences with similar multi-provenance settings. [Methods] Primarily analytical methods were utilized in the study (thin-section petrography, physical property testing, scanning electron microscopy (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), cathodoluminescence, X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy) to clarify the pore formation mechanisms and different diagenetic evolution of the tight sandstones in the study area. [Results] (1) Provenance variation has significantly influenced sandstone composition and the associated evolution of pores and diagenetic pathways. Feldspar-poor sandstones have developed in near-source areas (e.g., the Western Sichuan Depression and Northern Sichuan), resulting in fracture-pore composite systems; distal mixed-provenance regions (e.g., Central and Southern Sichuan) feature porosity-dominated reservoirs with a feldspar-rich matrix. (2) Highly rigid clasts with early-stage chlorite coatings inhibit compaction and partial cementation, preserving primary intergranular pores in deeply buried (> 5000 m) sandstones. (3) Organic acid dissolution, leaching by meteoric water and fracture-related deep-fluid dissolution are key drivers of secondary porosity, but with distinct

spatiotemporal distribution. **[Conclusions]** The interplay of provenance-driven rock fabric differences, burial/uplift history, fracture development and fluid–rock reactions has shaped the present reservoir heterogeneity in Xujiahe Formation sandstones.

Keywords: Tight gas sandstone; multi-provenance; diagenesis; pore formation mechanism; Xujiahe Formation; Sichuan Basin

