

煤系致密砂岩储集层特征及控制因素： 基于塔西南坳陷中一下侏罗统不同岩性组合的对比*

索义虎^{1,2} 朱世发^{1,2} 崔航^{1,2} 董尧^{1,2}
佟欢^{1,2} 冯凯力^{1,2} 陈才³

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘 要 煤系中致密砂岩储集层的岩性组合复杂, 导致不同岩性组合条件下的储集层质量差异显著, 其形成机理与控制因素缺乏系统认识。以塔里木盆地西南坳陷(简称“塔西南坳陷”)山前冲断带中一下侏罗统煤系致密砂岩储集层为研究对象, 综合岩心、薄片和扫描电镜分析等资料, 对不同岩性组合中的致密砂岩储集层进行对比研究。依据煤层发育特征及煤—砂—泥的叠置关系, 将岩性组合划分为辫状河三角洲平原组合 A、组合 B 及滨浅湖—辫状河三角洲前缘组合 C。不同岩性组合中致密砂岩储集层成岩演化过程及孔隙发育特征差异显著: 组合 A 压实作用中等, 早期方解石胶结物大量发育, 其形成时间早且与原生沉积流体相关, 溶蚀作用弱, 总面孔率约为 1.05%; 组合 B 与组合 C 受粒度、泥质含量尤其是煤层产生的腐殖酸影响, 压实作用较强, 晚期铁白云石及方解石胶结物形成与有机质演化有关, 煤系烃源岩产生的有机酸对长石和不稳定火山岩岩屑的溶蚀作用显著, 粒内溶孔发育, 总面孔率普遍大于 2.0%。聚煤环境决定了煤层和不同岩性组合的空间展布特征, 组合 A 和 B 分布于辫状河三角洲平原, 煤层总厚较小, 连续性相对较差; 组合 C 分布于滨浅湖—辫状河三角洲前缘, 煤层厚度中等且在平面上分布范围较广。虽然岩性和矿物组分影响了砂岩的初始沉积条件, 但更重要的是不同岩性组合中煤层对成岩作用的影响, 组合 B 和组合 C 煤层腐殖酸抑制砂岩储集层早期碳酸盐胶结, 导致压实作用增强, 成岩中期煤层产生有机酸促进长石和岩屑的溶蚀, 改善储集层物性。

关键词 塔西南坳陷 中一下侏罗统 煤系 致密砂岩储集层

第一作者简介 索义虎, 男, 1998 年生, 博士研究生, 主要从事储层地质学研究工作。E-mail: 15686942730@163.com。

通讯作者简介 朱世发, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积学与储层地质学的教学与科研工作。E-mail: zhushifa_zsf@163.com。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

Characteristics and controlling factors of coal-bearing tight sandstone reservoirs: based on comparison of different lithologic combinations of the Middle–Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

* 新疆维吾尔自治区重大科技专项(编号: 2025A01009)和中国石油天然气集团有限公司科技项目(编号: 2023ZZ14YJ02)资助。
[Co-funded by Xinjiang Major Science and Technology Project (No. 2025A01009) and the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation (No. 2023ZZ14YJ02)]

收稿日期: 2026-04-03 改回日期: 2026-04-27

SUO Yihu^{1,2} ZHU Shifa^{1,2} CUI Hang^{1,2} DONG Yao^{1,2}
TONG Huan^{1,2} FENG Kaili^{1,2} CHEN Cai³

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Tarim Oilfield Company, PetroChina, Xinjiang Korla 841000, China

Abstract Coal-bearing tight sandstone reservoirs exhibit pronounced heterogeneity in lithologic associations, leading to substantial variability in reservoir quality. However, the diagenetic mechanisms governing this heterogeneity and the key geological controls on pore evolution remain inadequately constrained. This study focuses on the Lower-Middle Jurassic coal-bearing tight sandstone reservoirs in piedmont thrust belt of Southwestern Tarim Depression. Integrating core descriptions, thin-section petrographic analysis, and scanning electron microscopy (SEM) observations, we conducted a systematic comparative evaluation of reservoir characteristics across distinct lithologic associations. Based on coal seam distribution patterns and the architectural stacking of coal-sand-mud successions, three principal lithologic associations were delineated: Association A (braided delta plain), Association B (braided delta plain), and Association C (shore-shallow lacustrine to braided delta front). Diagenetic histories and pore-system attributes differ markedly among these associations. Association A experienced moderate mechanical compaction and pervasive early-stage calcite cementation sourced from primary depositional fluids; dissolution was limited, yielding a low total surface porosity of ~1.05%. In contrast, Associations B and C are strongly modulated by grain size, mud content, and critically humic acids leached from adjacent coal seams, resulting in intensified compaction. Late-stage ferroan dolomite and calcite cements in these associations correlate temporally and spatially with organic matter maturation. Moreover, organic acids generated during coal-measure hydrocarbon generation significantly enhanced the dissolution of feldspars and unstable volcanic lithic fragments, giving rise to well-developed intragranular dissolution pores and consistently higher total surface porosities (>2.0%). The palaeoenvironment of coal accumulation governs both the spatial configuration of coal seams and the lateral extent of lithologic associations. Associations A and B predominantly occur within the braided delta plain, where coal seams are thin and laterally discontinuous; Association C is confined to the shore-shallow lacustrine to braided delta front, characterized by moderately thick, laterally continuous coal seams. While initial depositional lithology and mineralogy exert foundational control on sandstone properties, the influence of coal seams on post-depositional diagenesis particularly through acid-driven inhibition of early carbonate cementation and promotion of feldspar/lithic dissolution during the mesodiagenetic stage is the dominant factor differentiating reservoir quality across associations.

Key words Southwest Depression of Tarim Basin, Middle – Lower Jurassic, coal-bearing strata, tight sandstone reservoir

About the first author SUO Yihu, born in 1998, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in research on reservoir geology. E-mail: 15686942730@163.com.

About the corresponding author ZHU Shifa, born in 1982, is a Ph.D. supervisor and professor. He is mainly engaged in teaching and research on sedimentology and reservoir geology. E-mail: zhushifa_zsf@163.com.

0 引言

煤层广泛分布于中国各含油气盆地中,煤岩中有机质高度富集,演化阶段全过程生烃,使煤系储集层普遍富含天然气资源(邹才能等,2015;李国欣等,2025)。煤系致密砂岩储集层是当前非常规油气勘探领域的热点与难点,近年来备受学者关注(郭旭升等,2022;于景维等,2023)。在早期浅埋阶段与成岩中后期煤系烃源岩产生的不同类型酸性流体对砂岩储集层的成岩环境及孔隙演化起着重要控制作用(郑浚茂和应凤祥,1997;杨晓萍和顾家裕,2007;久博等,2018;孟祥超等,2022;宋磊等,2025)。

当前煤系致密砂岩研究仍存在一定的不足,多数研究以单一储集层类型或单一沉积相为研究对象,侧重于砂岩整体成岩演化特征分析(杨晓萍和顾家裕,2007;王粤川等,2017),对煤系地层中不同岩性组合条件下砂岩储集层特征的系统对比研究相对薄弱。研究表明,不同岩性或岩相组合条件下,砂岩成岩作用类型与强度存在明显差异,这将直接影响砂岩储集层孔隙结构与物性(Zhang *et al.*, 2020; 赵慧等, 2025)。此外,煤对顶板砂岩储集层物性和孔喉结构具有重要影响,距离煤—砂界面越近,砂岩储集层质量越好(Zhang *et al.*, 2024)。因此,系统厘清垂向上不同岩性组合中砂岩储集层特征,明确有利岩性组合类型,揭示煤层相关成岩流体对邻近砂岩储集层的改造机制,对深化煤系致密气资源勘探具有重要意义。

塔里木、准噶尔和鄂尔多斯等含油气盆地发育侏罗纪陆相的煤系和石炭纪—二叠纪海陆过渡相的煤系(李国欣等,2025)。塔里木盆地西南坳陷(简称“塔西南坳陷”)山前中—下侏罗统目前的研究主要集中在沉积演化、物源和烃源岩评价等方面(董尧等,2025;黎立等,2025)。前人对该地区中—下侏罗统砂岩储集层少有研究,煤系致密砂岩储集层往往具有强非均质性特征,缺少关于不同岩性组合中砂岩碎屑组分、成岩作用的差异性研究,对主控因素鲜见系统描述,制约了塔西南坳陷山前侏罗系勘探进程。笔者从甫沙地区井下和阿克陶地区露头中—下侏罗统不同岩性组合的砂岩储集层着手,基于岩石薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜等显微鉴定手段,结合高压压汞和同位素分析方法,详细分析了中—下侏罗统不同岩性组合中砂岩

储集层的岩石学、成岩作用、储集空间和物性特征,深入探讨沉积作用和煤系影响下成岩作用的多重控制因素,建立煤系不同岩性组合中致密砂岩储集层发育机理,为油气的进一步勘探开发提供重要的理论依据。

1 区域地质概况

塔西南坳陷位于塔里木盆地西南部,西北以南天山为界、西南至昆仑山前(图 1-A, 1-B)。根据盆地构造特征,山前地区主要位于塔西南坳陷西部和西南部,包含 4 个二级构造单元,即西昆仑山冲断带、西天山冲断带、喀什凹陷和叶城—和田凹陷(图 1-C)。塔西南经历多期的构造运动,包含 3 期的伸展—挤压构造旋回(王清华等,2023, 2024; 孙迪等, 2024)。侏罗纪为“断陷”发育阶段,整体沿山前带呈条带状分布;新生代以来受印度板块与青藏高原板块碰撞影响形成现今的构造格局(解巧明等,2019;刘军等,2023)。根据西昆仑山前冲断带变形特征可以系统地划分为 5 个构造段和 9 个构造带(陈汉林等,2018),文中研究区主要为阿克陶地区与甫沙地区,其中剖面样品主要取自乌泊尔构造带、苏盖特构造带、齐姆根构造带(阿克陶地区),井下样品主要取自柯东构造带(甫沙地区)。

塔西南坳陷侏罗系自下而上包括莎里塔什组、康苏组、杨叶组、塔尔尕组和库孜贡苏组(李文厚,1998)(图 1-D)。原特提斯洋的闭合和古特提斯洋的俯冲导致西昆仑山前基底分布特征具有明显差异,存在多个物源方向,侏罗系主要为西昆仑山和西天山供源,斜坡区供源较弱。研究区在早中侏罗世经历初始断陷期—强烈断陷期—断拗转化期的演化过程,莎里塔什组、康苏组和杨叶组经历浅湖—深湖的湖盆演化过程,发育相互分割的滨浅湖沉积,塔尔尕组沉积期湖盆水体变浅(Rembe *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2024)。塔西南山前陡坡带发育冲积扇—扇三角洲沉积体系,北部缓坡带局部发育转换带控制的辫状河三角洲和沼泽沉积;岩性多以砂岩、碳质泥岩和煤层为主(董尧等,2025)。

塔西南坳陷山前早中侏罗世植物较为繁盛,其中真蕨纲占优势,银杏纲次之,明显反映出亚热带—温带气候的地理特征。研究区康苏组与杨叶组主

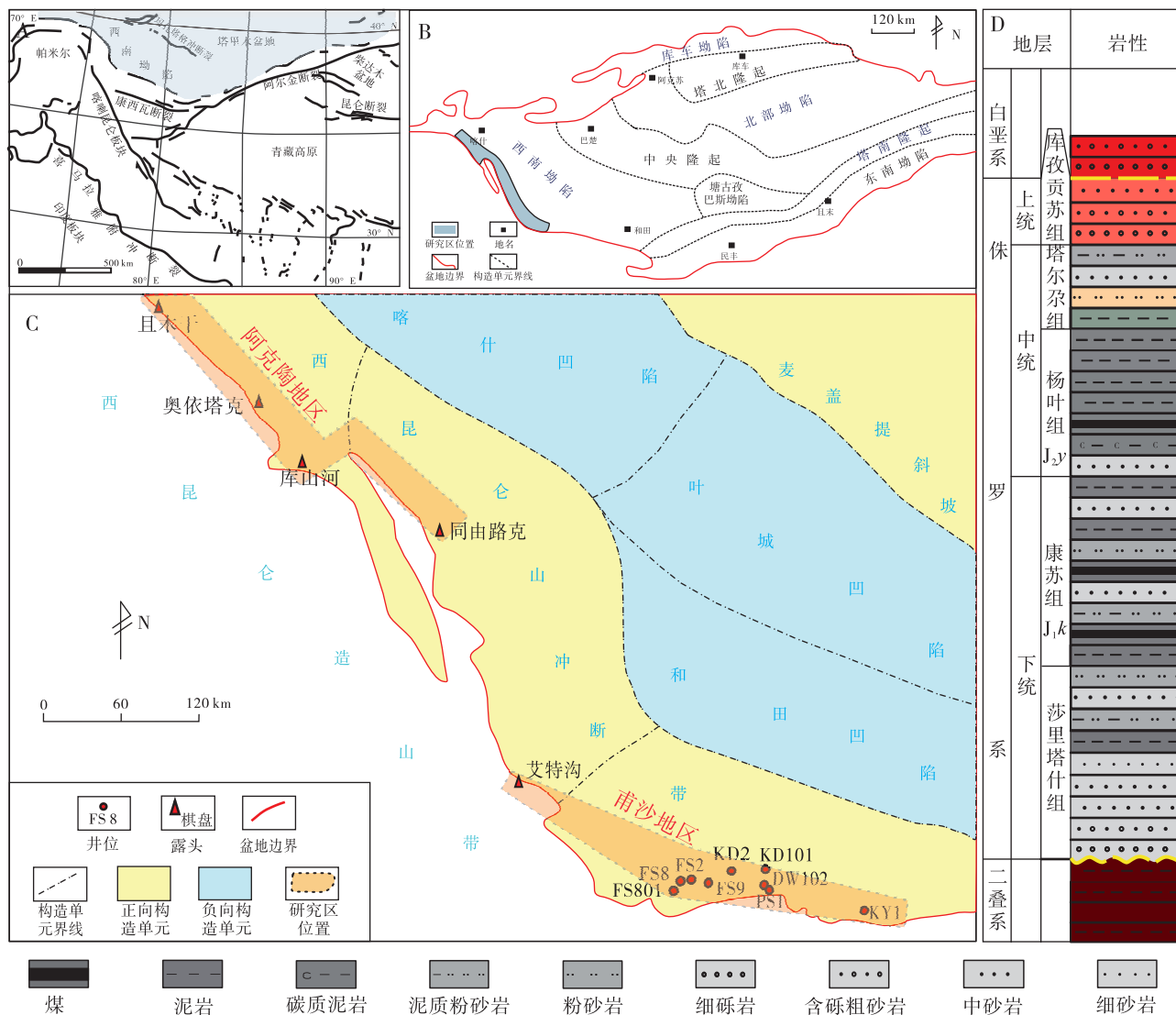


图 1 塔里木盆地西南坳陷的地理位置、构造单元和地层综合柱状图
Fig. 1 Geographic location, tectonic units, and comprehensive stratigraphic column of Southwest Depression of Tarim Basin

要含煤，煤层总厚度约 150 m，沼泽相主要在河流、三角洲平原和湖泊环境中发育。前人认为 2 期幕式构造运动控制聚煤期的形成，沉积环境决定了煤层的空间展布，高频的气候变化控制煤层迁移（杨峰等，2017；田继军等，2018；卞正富等，2024）。

针对塔西南坳陷山前中—下侏罗统不同岩性组合中砂岩储集层特征，选取 4 个剖面（64 块样品）和 7 口井（61 块样品）进行对比研究。在中国石油大学（北京）油气资源与探测全国重点实验室完成全岩稳定碳氧同位素、阴极发光、扫描电镜和薄片观察，全岩稳定碳氧同位素在 ThermoFisher

MAT 253 型质谱仪上完成；阴极发光实验在 CLF-2 阴极发光仪上进行观察和拍照；扫描电镜在仪器 Phenom XL G2 完成；岩石薄片的观察和拍照在奥林巴斯 BX51 型偏光显微镜下完成。此外，高压压汞和物性测试实验数据均来自塔里木油田勘探开发研究院。

2 岩性组合和岩石学特征

2.1 岩性组合特征

塔西南坳陷山前侏罗系的煤层、砂岩与泥岩在垂向上构成多期叠置“煤—砂—泥”旋回组合，

其岩性组合主要受沉积环境控制。前人研究表明煤系在沉积过程中可形成厚煤/泥—厚砂、厚煤/泥—薄砂以及厚砂—薄煤/泥等不同岩性组合，不同岩性或岩相组合控制了砂岩成岩作用特征及储集层质量差异（Li *et al.*, 2025）。本研究以沉积亚相（辫状河三角洲平原、滨浅湖—辫状河三角洲前缘）为一级分类单元，以不同沉积环境下“煤—砂—泥”岩性组合关系为核心，将塔西南山中—下侏罗统岩性组合类型系统划分为 3 类（图 2）。

辫状河三角洲平原沉积体系中多发育岩性组合 A 和岩性组合 B。组合 A 表现为中—厚层砂岩夹泥岩，整体不发育煤层，为辫状河三角洲平原分流河道及分流河道间沉积。组合 A 分流河道砂体普遍发育上细下粗的正粒序结构，以大型交错层理和平行层理砂岩为主，砂体底部常见明显冲刷界面，反映出较强的水动力条件和频繁的河道迁移过程。组合 B 表现为中—厚层砂岩夹泥岩—薄煤层组合，反映了沉积环境由分流河道、洪泛平原向沼泽环境的周期性演化过程。组合 B 底部常见粗粒沉积物对下伏细粒沉积物的冲刷界面，砂体内部可见泥砾或煤屑；向上逐渐过渡为中—细砂岩，发育槽状交错层理；中上部主要为煤层与碳质泥岩组合，煤层内部结构相对均一，常见水平层理和弱条带状构

造，局部可见植物碎屑富集带。组合 B 煤层多形成于分流河道间低洼沼泽环境，由于辫状分流河道的频繁迁移及河道的侧向侵蚀作用，煤层常被河道砂体切割，单层煤层厚度普遍小于 0.5 m，横向连续性较差，多呈透镜状或局部不连续分布。由此可知该组合煤层聚煤条件一般，厚度较小且稳定性较差。

滨浅湖—辫状河三角洲前缘发育岩性组合 C。组合 C 表现为厚层泥岩夹多层薄砂岩—煤层组合，其底部常发育辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体，沉积环境自下而上经历了由辫状河三角洲前缘水下分流河道向滨湖沼泽及滩坝的演化过程，垂向上煤层常与滨湖泥岩及细粒砂质沉积物交替出现，反映出湖平面波动控制下的周期性沉积特征。在湖盆水体相对较浅的滨湖平原地区，可容空间增加速率与泥炭堆积速率基本保持平衡，有利于泥炭持续堆积并形成较稳定的煤层。滨湖沼泽微相中沼泽水源主要来自湖水补给，水体稳定且水动力较弱，因此煤层在平面上分布范围较广且发育位置相对稳定，煤层厚度一般为小—中等，但累积厚度较大，煤层总厚度普遍大于 2.5 m。煤层内部结构较为均一，以水平层理和弱条带状构造为主，局部可见植物碎屑定向排列及炭化植物残体。

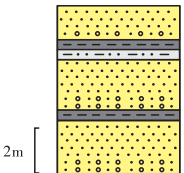
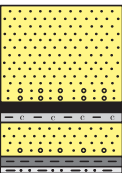
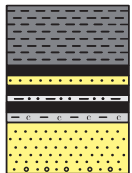
岩性组合	组合A	组合B	组合C
	中厚层砂岩夹泥岩 (分流河道及分流河道间)	中厚层砂岩夹泥岩—薄煤层 (分流河道、洪泛平原向沼泽环境演化)	顶板泥岩夹多层薄砂—煤层， 底板中厚层砂岩 (水下分流河道向滨湖沼泽及滩坝环境演化)
岩性组合模式			
典型实例	且木干、奥依塔克、艾特沟剖面	且木干、奥依塔克、艾特沟剖面； KD101井	库山河、同由路克、艾特沟剖面；FS801 FS9、KD2、FS8、FS1、DW102、KY1井
沉积环境	辫状河三角洲平原	辫状河三角洲平原	滨浅湖、滩坝、 辫状河三角洲前缘
聚煤环境	/	分流河道间沼泽， 远离聚煤中心	滨湖沼泽， 靠近聚煤中心
煤层稳定性	/	不稳定—较稳定	稳定
单厚（总厚） /煤层层数	/	<0.5 m（<1 m） /1~2层	≥0.5 m（≥2.5 m） /5~14层
			

图 2 塔西南坳陷中—下侏罗统煤系岩性组合模式

Fig. 2 Lithologic association patterns of coal-bearing strata in the Middle–Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

2.2 岩石学特征

研究区中一下侏罗统发育近源堆积的辫状河三角洲沉积, 岩性主要为细砂岩和中砂岩, 其次为含砾砂岩、粗砂岩及粉砂岩。通过薄片的系统观察与鉴定, 研究区中一下侏罗统不同岩性组合中的砂岩碎屑颗粒组分以石英和岩屑为主, 长石和云母等矿物碎屑含量较少; 石英含量为 10.0%~80.0%, 平均为 51.6%; 长石含量为 0%~38.0%, 平均为 6.0%, 多为钾长石; 岩屑含量为 13.0%~90.0%, 平均为 42.4%。统计表明研究区组合 A 中砂岩储集层以长石岩屑砂岩为主, 碎屑颗粒分选较差, 磨圆为次棱角状(图 3); 组合 B 中砂岩储集层以岩屑、石英为主, 结构成熟度偏低, 泥质杂基含量中等; 组合 C 中砂岩储集层主要为岩屑砂岩, 分选中等, 磨圆以次棱角状一次圆状为主, 泥质杂基含量中等。

3 成岩作用与成岩演化序列

由于帕米尔构造带向北的强烈推进和巨大的地壳缩短, 导致西昆仑山前冲断带的构造变形表现出明显的空间差异性(陈汉林等, 2018)。早成岩阶段一中成岩阶段 A 期阿克陶地区侏罗系露头样品与甫沙地区侏罗系井下样品成岩特征相似。露头在古近纪开始隆升并于新近纪强烈抬升, 井下样品则经历小幅度抬升和持续深埋, 新生代以来两个地区构造演化差异明显。为突出沉积与埋藏成岩对储集层的控制作用, 本研究暂不考虑新生代构造抬升及其诱导的裂缝与外源流体改造, 仅从埋藏演化与成岩过程对两地区侏罗系不同岩性组合中的砂岩储集层进行对比分析。为保证对比的合理性, 在层位对比及岩性组合一致的基础上, 优先选取弱风化样品。

3.1 压实作用

压实作用是煤系砂岩储集层孔隙度减小、致密化最主要的原因(于景维等, 2023; 宋磊等, 2025)。组合 A 中砂岩储集层压实作用最弱, 颗粒间以点一线接触为主(图 4-A)。组合 B 中紧邻煤层的砂岩储集层, 在早成岩阶段孔隙水为酸性条件, 储集层中缺少早期胶结物抵抗压实, 镜下可见塑性岩屑颗粒(蚀变的喷出岩岩屑、片岩岩屑和

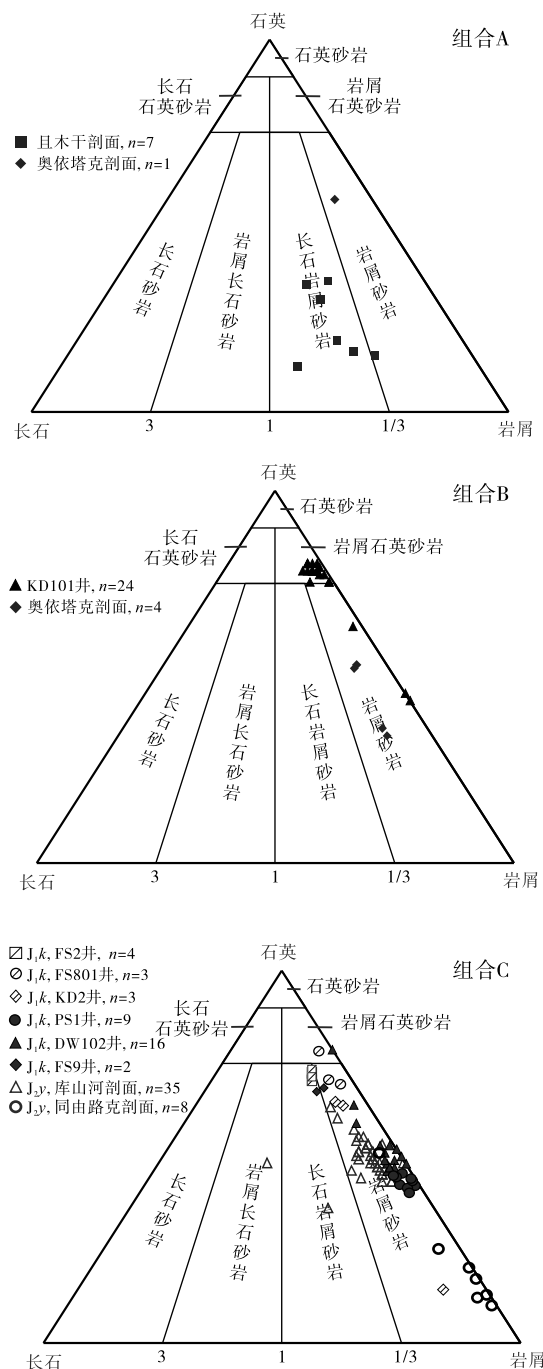
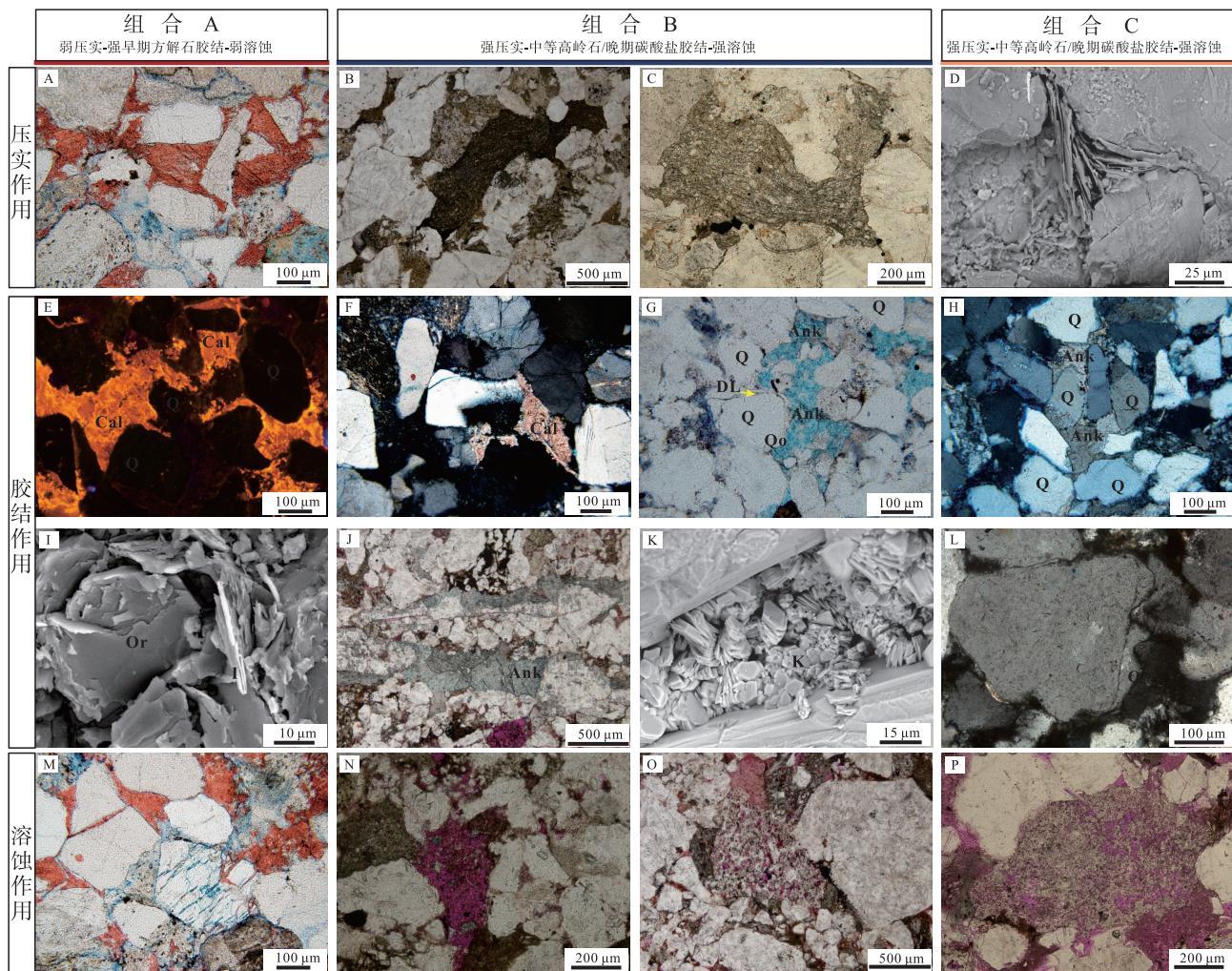


图 3 塔西南坳陷中一下侏罗统不同岩性组合岩石分类三角图
Fig. 3 Ternary diagrams of rock classification for different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

泥质) 压实变形(图 4-B, 4-C) 并形成假杂基, 加剧了压实作用对原生孔隙的破坏, 现今的碎屑颗粒以线一凹凸接触为主, 压实作用中等一强。组合 C 煤层附近一定范围内的砂岩储集层压实作用程度



A—奥依塔克剖面, J_1k , 点一线接触, 单偏光; B—KD101 井, J_1k , 4316.55 m, 塑性岩屑压实变形, 单偏光; C—KD101 井, J_1k , 4315.75 m, 塑性岩屑压实变形, 单偏光; D—KD2 井, J_2y , 2272 m, 塑性颗粒云母压实变形, 扫描电镜; E—奥依塔克剖面, J_1k , 方解石胶结物发橙黄色光, 阴极发光; F—奥依塔克剖面, J_1k , 晚期方解石孔隙式胶结, 正交光, 混合液染色; G—KD101 井, J_1k , 4192.10 m, 铁白云石胶结物被染成蓝色, 单偏光, 混合液染色; H—FS2 井, J_1k , 5005.5 m, 铁白云石胶结物, 正交光, 混合液染色; I—库山河剖面, J_2y , 片状伊利石, 扫描电镜; J—KD101 井, J_1k , 4316.98 m, 铁白云石胶结物充填裂缝, 单偏光, 混合液染色; K—KD101 井, J_1k , 4192.10 m, 高岭石充填粒间孔隙, 扫描电镜; L—KD2 井, J_2y , 2272.5 m, 石英次生加大, 正交光; M—奥依塔克剖面, J_1k , 长石粒内溶孔, 单偏光, 蓝色铸体; N—KD101 井, J_1k , 4316.98 m, 碎屑颗粒溶蚀, 单偏光, 红色铸体; O—KD101 井, J_1k , 4316.46 m, 岩屑颗粒粒内溶蚀, 单偏光, 红色铸体; P—KD2 井, J_2y , 2272.5 m, 岩屑颗粒粒内溶蚀, 单偏光, 红色铸体。DF 塑性岩屑; Q 石英; Qo 石英加大边; DL 尘埃线; Cal 方解石; Ank 铁白云石; K 高岭石; Or 钾长石; I 伊利石

图 4 塔西南坳陷中一下侏罗统不同岩性组合成岩作用特征显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of diagenetic features of different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

与组合 B 相似。

3.2 胶结作用

研究区目的层发育多期次的自生成岩矿物, 以铁白云石和方解石胶结为主, 其次为黏土矿物和硅质胶结, 铁方解石胶结物含量较少(图 4-E 至图 4

-L)。组合 A 发育早期方解石胶结物, 镜下混合液染色显示为红色, 阴极发光下发橙黄色光(图 4-A, 4-E)。组合 B 和组合 C 中多以铁白云石、硅质与高岭石胶结为主, 方解石胶结物含量较少, 见少量方解石胶结物孔隙式充填孔隙(4-F)。铁白云石镜下混合液染色显示为蓝色, 多以分散晶形充

填粒间孔隙(图 4-G, 4-H, 4-J), 扫描电镜下呈菱面体产出。常见自生高岭石呈蠕虫状集合体充填粒间孔隙(图 4-K), 或充填在长石溶蚀形成的粒内溶孔中, 表明高岭石的形成可能与长石的溶蚀相关。石英次生加大为 I—II 级, 以碎屑石英颗粒边缘“尘埃线”为界分布(图 4-G, 4-L), 多被铁白云石胶结物包裹。

3.3 溶蚀作用和交代作用

组合 A 溶蚀作用较弱, 组合 B 和组合 C 砂岩储集层溶蚀作用中等—强, 镜下常见火山岩岩屑和长石等不稳定组分发生溶解(图 4-M 至 4-P), 方解石胶结物溶蚀作用较弱。研究区交代作用在不同岩性组合中的砂岩储集层均有发育, 常见铁白云石胶结物交代石英颗粒边缘, 方解石胶结物交代长石或岩屑颗粒。

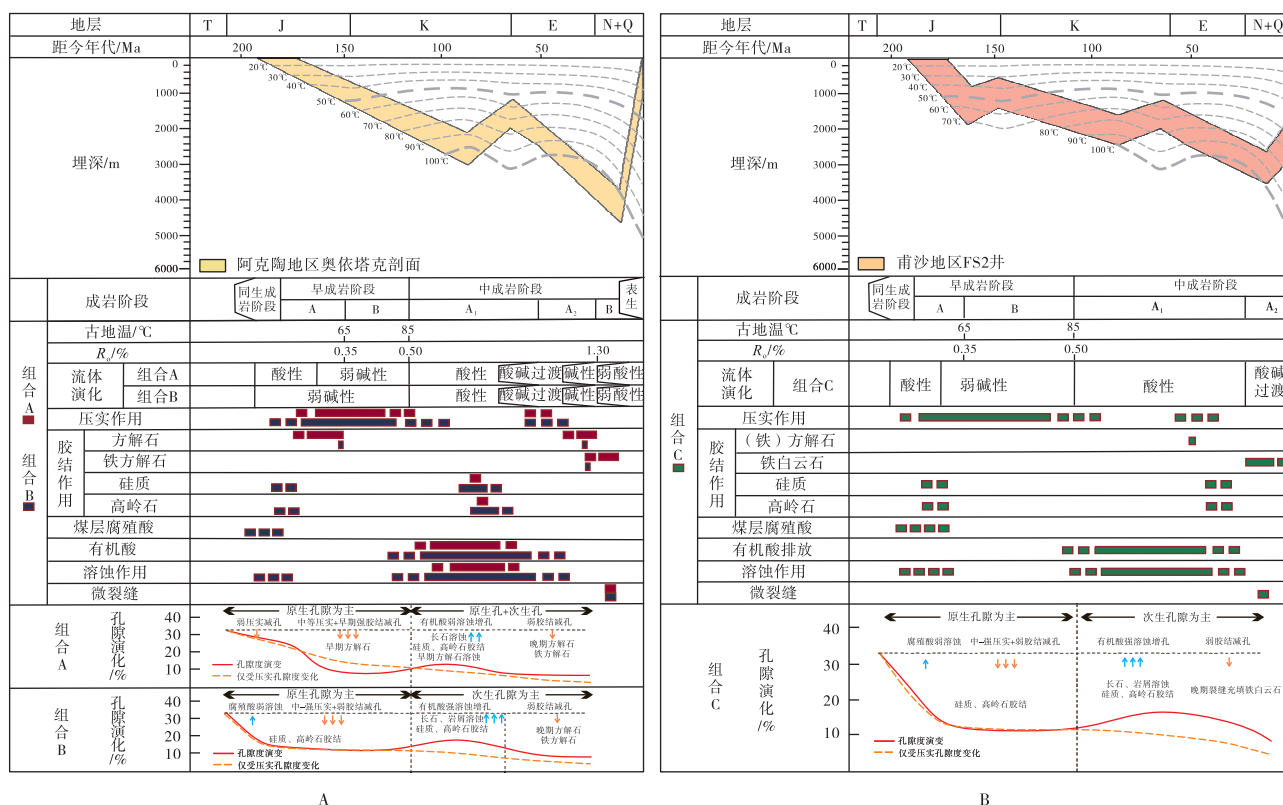
3.4 成岩作用阶段与序列

由上文可知不同岩性组合中的砂岩储集层成岩作用存在明显的差异。本次研究选取阿克陶地区奥

依塔克剖面组合 A 和组合 B, 甫沙地区 FS2 井组合 C 中的砂岩储集层样品。样品最大埋深均超过 4500 m, 伊/蒙混层中蒙皂石含量介于 20%~30%, 黏土矿物中高岭石含量较高, 偶见毛发状绿泥石和针叶状绿泥石, 反映砂岩储集层中成岩阶段 A_1 — A_2 特征(图 5), 最高可处于中成岩 B 期。此外, 采用“反演回剥法”对不同岩性组合中砂岩储集层进行孔隙度演化恢复。

组合 A: 同生—早成岩早期, 砂岩储集层发育早期方解石胶结物。早成岩中—晚期, 压实作用逐渐增强, 储集层孔隙度逐渐减小。中成岩 A 期, 泥页岩烃源岩释放有机酸对砂岩储集层溶蚀作用较弱。中成岩 A_2 晚期—B 早期, 在弱碱性环境下晚期方解石和铁方解石发生胶结(图 4-A; 图 5-A), 孔隙度进一步降低。随后阿克陶地区发生构造抬升, 成岩环境转化为弱酸性, 但总体持续时间较短, 对储集层成岩作用的影响有限。

组合 B: 同生阶段煤层产生腐殖酸, 靠近煤层的砂岩储集层不发育早期方解石胶结物; 此时刚开



A—阿克陶地区奥依塔克剖面组合 A 与组合 B 砂岩储集层成岩序列; B—甫沙地区 FS2 井组合 C 砂岩储集层成岩序列

图 5 塔西南坳陷中—下侏罗统不同岩性组合砂岩储集层成岩序列

Fig. 5 Diagenetic sequences of sandstone reservoirs in different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

始进行压实, 渗流条件极佳, 高岭石和硅质不易胶结(孟祥超等, 2022)。早成岩 A 期在弱酸性条件下发育石英次生加大和高岭石胶结物, 压实作用快速增强, 孔隙度在短时间内降低; 早成岩 B 期逐渐转化为弱碱性环境。中成岩 A 期, 薄煤层和泥岩产生的有机酸对储集层进行溶蚀改造, 岩石结构成熟度较高且渗流条件较好的砂岩储集层孔隙度增加; 此外, 可见高岭石以蠕虫状集合体充填粒间孔隙(图 4-K)。中成岩 A₂ 晚期—B 早期, 流体性质逐渐向碱性条件转变, pH 值升高, 发育晚期碳酸盐胶结物, 孔隙度进一步降低。表生阶段对砂岩储集层影响较弱。

组合 C: 同生—早成岩期与组合 B 成岩—孔隙演化相似。中成岩 A 期, 煤系烃源岩溶蚀不稳定岩屑颗粒形成大量蜂窝状孔隙(图 4-P)。中成岩 A₂ 晚期, 有机酸浓度降低, 成岩环境由酸性逐渐向碱性转变, 构造抬升导致裂缝充填铁白云石胶结物。

4 储集空间特征及物性差异

受成岩作用的影响, 不同岩性组合储集空间特征存在明显差异(图 6-A 至 6-H)。从薄片中可以看见, 组合 A 中少见孔隙边缘较平直或者较规则的原生孔隙, 偶见不稳定岩屑溶蚀形成的粒间或粒内溶蚀孔隙, 方解石胶结物溶蚀形成的粒间孔隙较少(图 6-A, 6-E)。组合 B 和组合 C 孔隙类型较为复杂, 多以次生孔隙为主, 可以分为早期腐殖酸和晚期有机酸不同成因机制形成的次生孔隙; 早期腐殖酸溶蚀发生在压实作用之前或初期, 薄片中可以看到溶蚀孔隙被后期压实变形, 孔隙呈扁平或拉长状, 溶蚀的边界可以被后期的石英加大边不完全覆盖, 溶蚀孔中书页状高岭石含量较高; 后期有机酸多为溶蚀不稳定岩屑颗粒形成粒内溶孔, 孔隙形态大小各异, 孔隙的形态较为完整(图 6-F, 6-H)。偶见未被完全胶结的剩余原生孔隙, 其孔隙内部较为干净(图 6-B, 6-C, 6-D)。构造裂缝具有一定的方向性, 呈贯穿状(图 6-G)。

煤系致密砂岩储集空间类型主要为次生孔隙, 总面孔率平均为 1.2%。组合 A 储集层物性最差, 总面孔率为 1.05%; 组合 B 与组合 C 中砂岩储集层面孔率相对较高, 面孔率普遍大于 2%(图 7-A)。由于组合 A 砂岩储集层实测物性数据

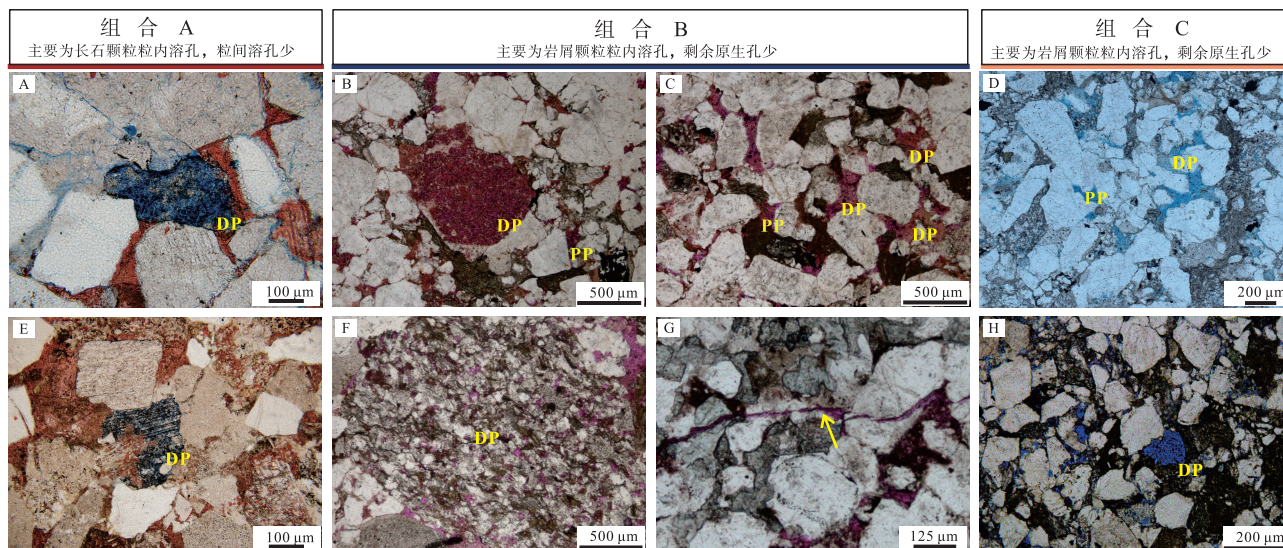
较少, 本研究仅对组合 B 和组合 C 砂岩储集层的物性进行统计, 孔隙度为 0.93%~8.11%, 平均值为 2.32%; 渗透率在 $(0.01 \sim 2.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 属于低孔—特低孔、低渗—特低渗储集层(图 7-B)。此外, 对组合 A 和组合 C 砂岩储集层的高压压汞数据进行分析(数据来源于塔里木油田), 结果表明, 组合 A 中砂岩储集层排驱压力较高, 在 0.47~0.67 MPa 之间, 曲线形态呈高排驱压力—陡直曲线型, 中值压力在 11.95~12.29 MPa 之间, 孔喉半径小, 集中分布在 0.01~1 μm 之间, 反映整体连通性差, 储集层质量较差, 这可能与砂岩储集层中强碳酸盐胶结有关。组合 C 中砂岩储集层排驱压力中等, 在 0.08~0.79 MPa 之间, 曲线形态呈中等排驱压力—阶梯型曲线, 中值压力在 1.64~4.16 MPa 之间, 孔喉半径集中分布在 0.1~10 μm 之间, 反映整体连通性中等, 储集层质量中等, 这可能与砂岩储集层中的溶蚀孔隙发育有关(图 8)。

5 煤系致密砂岩储集层控制因素

5.1 沉积作用

5.1.1 聚煤环境

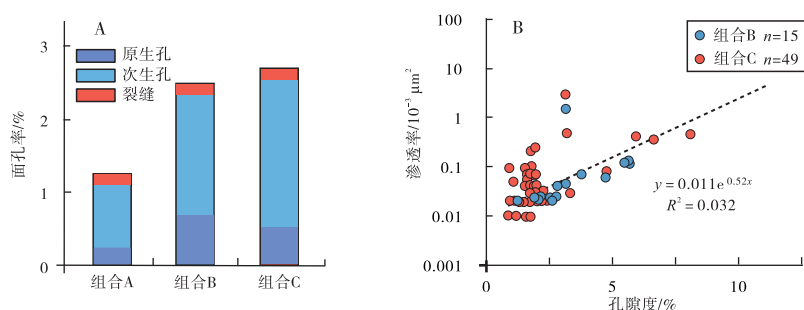
塔西南坳陷山前侏罗系发育多种沉积相类型, 煤层发育于辫状河三角洲与湖泊沉积环境。聚煤环境不仅控制煤层及不同岩性组合的空间分布特征, 同时也对后续成岩作用及储集层演化过程产生重要影响(孟祥超等, 2022; Li *et al.*, 2025)。组合 A 和组合 B 主要分布于阿克陶地区的辫状河三角洲平原相沉积中, 靠近物源区, 远离湖盆聚煤中心。组合 A 中基本不发育煤层, 组合 B 中的煤层多形成于辫状河三角洲平原分流河道之间的低洼区淤积环境; 由于分流河道频繁迁移和切割作用, 导致组合 B 中的煤层分布范围和总厚度均较小, 横向连续性较差, 单层煤层厚度普遍小于 0.5 m, 多呈透镜状或局部不连续分布, 后续煤层产生的酸性流体对砂岩储集层影响的范围有限。组合 C 主要分布于甫沙地区滨浅湖—辫状河三角洲前缘沉积, 煤层主要受湖平面变化的控制, 在湖盆进积与退积的转换阶段, 滨湖沼泽环境易于形成并发生有机质大量堆积, 湖平面频繁波动导致组合 C 中单煤层厚度一般比较小、总厚度中等且在平面上分布范围较广



A—奥依塔克剖面, J_1k , 岩屑粒内溶孔, 单偏光, 蓝色铸体; B—KD101 井, J_1k , 4315.75 m, 剩余原生粒间孔隙与岩屑粒内溶孔, 单偏光, 红色铸体; C—KD101 井, J_1k , 岩屑颗粒粒内溶蚀孔隙和剩余原生孔隙, 单偏光, 红色铸体; D—PS1 井, J_2y , 剩余原生粒间孔隙与岩屑粒内溶孔, 偶见铸模孔, 蓝色铸体; E—奥依塔克剖面, J_1k , 长石颗粒解理缝溶蚀, 单偏光, 蓝色铸体; F—KD101 井, J_1k , 4316.55 m, 岩屑颗粒粒内孔隙与粒间孔隙, 单偏光, 红色铸体; G—KD101 井, J_1k , 4192.1 m, 剪切缝, 红色铸体; H—艾特沟剖面, J_2y , 岩屑溶蚀形成铸模孔, 蓝色铸体。DP—原生孔隙; PP—原生孔隙

图 6 塔西南坳陷中一下侏罗统不同岩性组合砂岩储集空间特征

Fig. 6 Reservoir space characteristics of sandstones in different lithologic associations of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin



A—不同岩性组合面孔率特征; B—组合 B 与组合 C 物性特征

图 7 塔西南坳陷中一下侏罗统不同岩性组合砂岩储集层面孔率与物性特征

Fig. 7 Surface porosity and petrophysical characteristics of sandstone reservoirs in different lithologic associations of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

(田继军等, 2018), 因此煤层成岩中期产生的酸性流体影响范围较广。通常情况下, 紧邻煤层的砂岩储集层更易受到演化过程中产生的酸性流体影响, 在埋藏过程中表现出强压实和强溶蚀的成岩作用特征, 从而对储集层孔隙结构和物性产生重要影响 (Zhang *et al.*, 2024)。

5.1.2 岩性和矿物组分

研究区中一下侏罗统岩性主要为含砾砂岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩等。前人研究表明, 强水动

力条件下形成的砂砾岩粒度较粗、泥质含量较低, 粒度相对较粗的砂岩储集层物性较好 (朱筱敏等, 2019)。分布于辫状河三角洲平原分流河道组合 A 和组合 B、辫状河三角洲前缘水下分流河道的组合 C, 发育中厚层中粗砂岩, 泥质杂基含量较低, 初始孔隙度较高, 抗压能力强, 储集层物性较好。

矿物组分主要受物源区母岩控制, 不同物源导致塑性颗粒与不稳定碎屑颗粒类型及含量存在显著差异, 进而对成岩演化过程产生重要影响。前人认

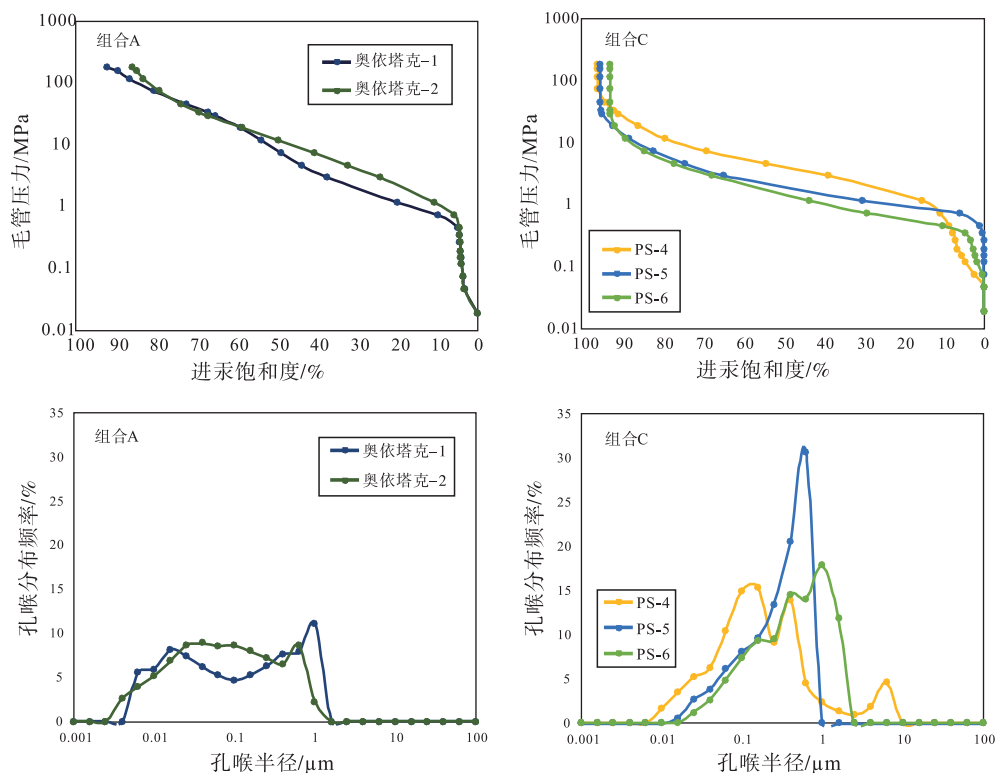


图 8 塔西南坳陷中一下侏罗统组合 A 与组合 C 砂岩储集层高压压汞曲线与孔喉分布曲线

Fig. 8 High-pressure mercury intrusion curves and pore-throat size distribution of sandstone reservoirs in lithologic associations A and C of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

为不同地区中一下侏罗统砂岩储集层矿物组分存在明显的差异 (董尧等, 2025; 孙春燕等, 2026)。组合 A 和组合 B 主要分布在阿克陶地区, 塑性颗粒类型包括蚀变长石、云母、喷出岩岩屑和泥岩岩屑, 含量多在 5%~10% 之间; 刚性颗粒类型以未蚀变长石和花岗岩岩屑为主。组合 C 主要分布在甫沙地区, 塑性颗粒类型主要为泥岩岩屑和千枚岩岩屑等, 含量普遍大于 10%; 刚性颗粒多为石英、石英岩岩屑、燧石颗粒。受限于实验资料数量, 本研究以柯东 101 井的组合 B 为例, 石英和未蚀变长石等刚性颗粒含量越高, 砂岩的抗压实能力越强, 有利于原生粒间孔隙的保存, 并为后期酸性流体对储集层进行溶蚀改造提供有利条件。塑性颗粒在埋藏压实过程中易发生变形, 充填或堵塞粒间孔隙并降低孔喉连通性, 从而对储集层物性产生明显的不利影响 (图 9)。

5.2 煤层影响下的成岩作用

5.2.1 压实作用

研究区煤系烃源岩富含有机质, 在成岩过程中

产生大量酸性流体, 不同煤阶产生的酸性流体对储集层的影响存在明显的差异 (姚海鹏等, 2019)。在泥炭转化褐煤之前, 植物遗体发生降解, 腐殖酸产物包括木质素、纤维素转化形成的酚酸、苯酚酸和脂肪酸等 (李艳霞等, 2015), 导致砂岩储集层中水介质 pH 值在 4 左右, 酸性流体浓度增加 (郑浚茂和应凤祥, 1997)。煤层腐殖酸导致组合 B 与组合 C 中的砂岩储集层缺少方解石、石膏等早期胶结物 (图 4-C, 4-G, 4-H), 埋藏过程中抗压实能力降低, 碎屑颗粒间以线接触为主。组合 A 发育早期胶结物, 以连晶式充填粒间孔隙、抵抗压实, 碎屑颗粒间以点—线接触为主 (图 4-A, 4-E), 组合 A 中砂岩储集层压实作用最弱。本研究以组合 A 和组合 B 中砂岩储集层为例 (图 10), 组合 A 压实作用造成孔隙度减少比例普遍在 50%~85% 之间; 组合 B 压实作用减孔率普遍大于 85%。表明煤层早期腐殖酸对岩石碎屑结构产生负面作用, 降低了碎屑颗粒的抗压实能力。

5.2.2 胶结作用

不同成岩环境中形成的碳酸盐胶结物, 其同位

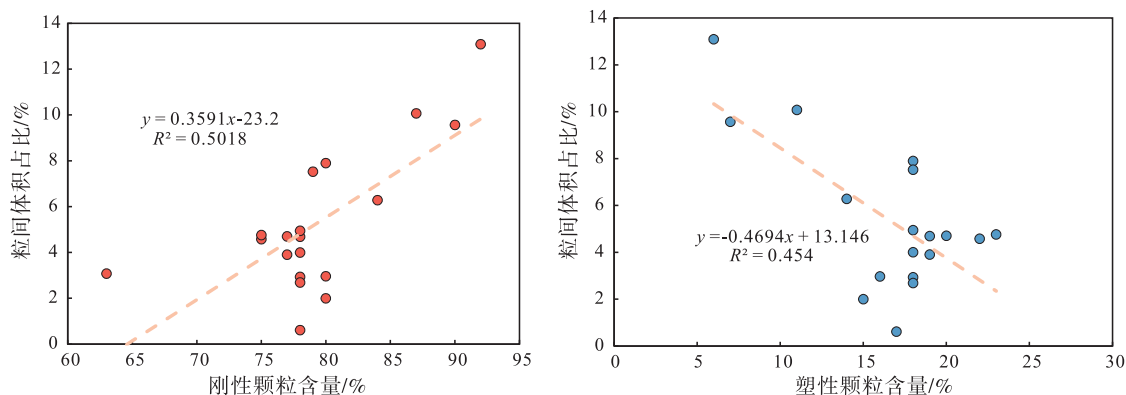
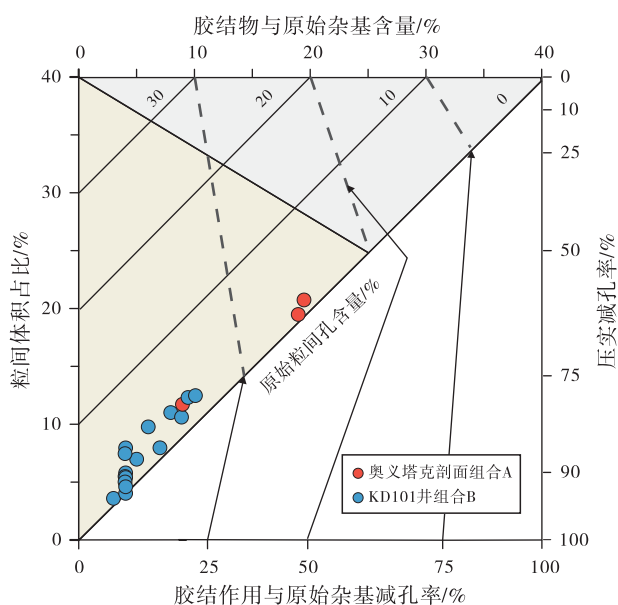


图 9 塔西南坳陷中—下侏罗统组合 B 中砂岩储集层岩石碎屑组分与粒间体积占比关系

Fig. 9 Relationship between detrital components and intergranular volume of sandstone reservoirs in lithologic association B of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

图 10 塔西南坳陷中—下侏罗统砂岩粒间体积占比与胶结物体积交会图(据 Ehrenberg, 1989; Yang *et al.*, 2021)Fig. 10 Cross plot of intergranular volume versus cement volume of sandstones in different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin (modified after Ehrenberg, 1989; Yang *et al.*, 2021)

素特征具有一定的差异性和规律性(魏巍等, 2015; 王代富等, 2017), 可以反映研究区不同岩性组合中碳酸盐胶结物物质来源和成因。实验数据表明组合 A 中方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值主要分布在 $7.0\text{‰} \sim 3.40\text{‰}$ 之间, 平均值为 5.0‰ , 碳同位素整体表现为相对正偏特征(图 11), 反映碳源主要来自大气淡水中的溶解无机碳。在早成岩阶段埋藏压实过程中, 原生沉积孔隙水为碳酸盐沉淀提供了金

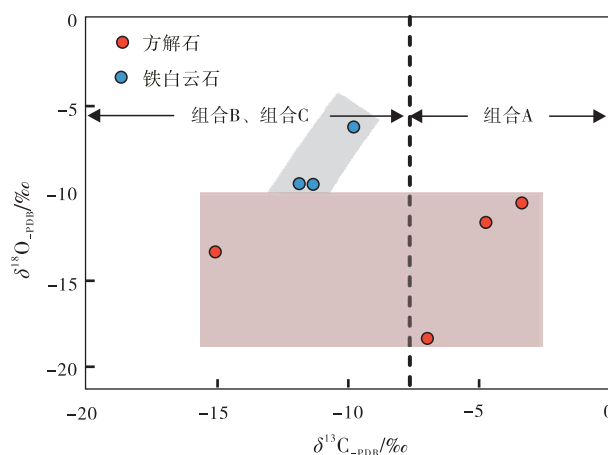


图 11 塔西南坳陷中—下侏罗统不同岩性组合砂岩储集层碳酸盐胶结物碳、氧同位素特征

Fig. 11 Carbon and oxygen isotopic characteristics of carbonate cements in sandstone reservoirs in different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

属阳离子, 大气淡水提供了主要的碳源, 随着孔隙水中碳酸钙逐渐达到过饱和状态, 碳酸盐矿物在砂—泥岩界面附近沉淀并形成较为致密的碳酸盐胶结(张青青等, 2021)。

组合 C 煤层累计厚度大, 早期腐殖酸影响范围广, 导致早期方解石胶结不发育; 组合 B 中腐殖酸仅对邻近砂岩储集层中的早期方解石具有抑制作用。组合 B 和组合 C 中碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值主要分布在 $11.5\text{‰} \sim 9.8\text{‰}$ 之间, 平均值为 10.9‰ , 整体相对负偏(图 11)。表明碳源主要来自有机质热演化过程中脱羧作用产生的 CO_2 , 黏土矿物转化过程中释放的成岩流体以及孔隙水为碳酸盐沉淀提

供了必要的金属阳离子，成岩流体多沿岩石结构成熟度较高的渗流通道进行运移并发生胶结，镜下可观察到铁白云石和方解石胶结物孔隙式充填粒间孔隙，表明该类碳酸盐胶结形成时间相对较晚。

5.2.3 溶蚀作用

前人研究表明，以Ⅲ型有机质为主的煤系烃源岩在生烃过程中产生的有机酸含量比其他类型有机质高数百倍，干酪根脱氧过程中产生的有机酸（短链脂肪酸、草酸等）导致孔隙介质为酸性（郑浚茂和应凤祥，1997；李艳霞等，2015）。研究区目的层有机质类型主要为Ⅲ型，少部分有机质类型为Ⅱ₁、Ⅱ₂型（孙迪等，2024）。组合A中泥页岩释放的有机酸对砂/泥界面附近的砂岩储集层进行溶蚀改造，可见少量早期方解石胶结物和不稳定碎屑矿物溶蚀，储集层改造能力较弱。在组合B和组合C的砂岩储集层中，常见长石解理缝发生溶蚀，形成网格状溶蚀孔隙；同时，在岩屑内部形成蜂窝状粒内溶蚀孔隙（图4-N至4-P），表明有机酸溶蚀作用在该类储集层中较为发育，并对次生孔

隙的形成具有重要贡献。组合C垂向上煤层叠置出现，多煤层释放的有机酸导致溶蚀作用较组合B强。

5.3 煤系致密砂岩储集层发育机制

综上所述，不同岩性组合中的砂岩储集层受聚煤环境、矿物组分与成岩作用的共同控制，导致其发育机制存在明显差异，从而决定了最终储集层孔隙结构及物性的差别。

组合A中缺少煤层。岩性以粗砂岩和含砾砂岩为主，结构成熟度较低。成岩早期主要受原生沉积水和大气淡水作用的影响，易形成早期方解石胶结物，在一定程度上提高了砂岩骨架的抗压实能力；但大量碳酸盐胶结物充填的同时限制了后期酸性流体渗流通道的发育。进入成岩中期阶段，由于泥页岩中有机质生成的有机酸供给能力相对较弱，酸性流体来源不足，导致对长石及岩屑等易溶组分的溶蚀作用较为有限，次生溶蚀孔隙发育程度较低，最终形成物性较差且非均质性较强的储集层。

组合B中发育薄煤层，整体厚度较小。岩性

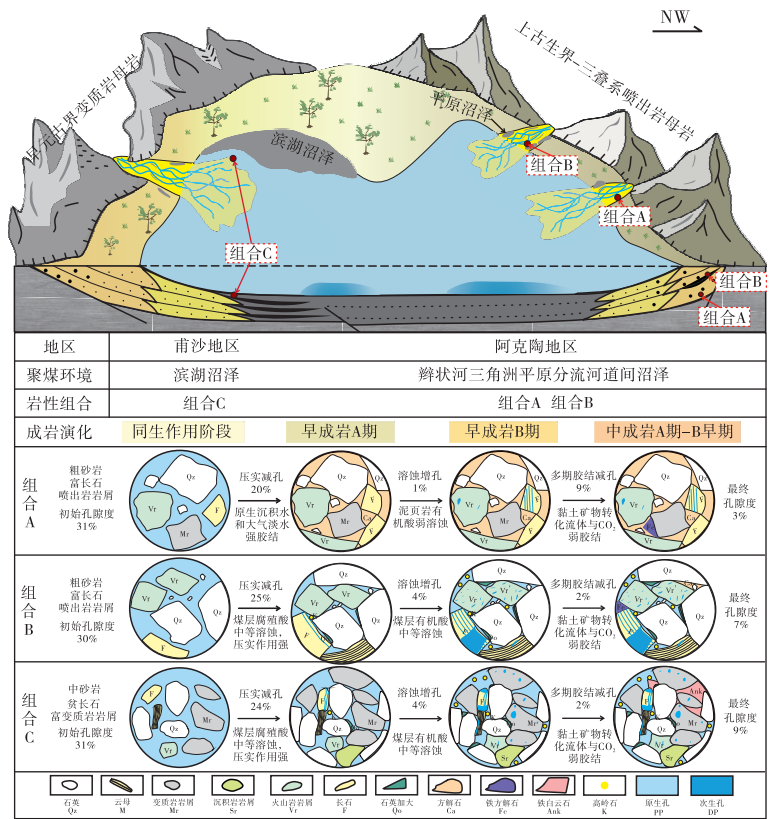


Fig. 12 Differential development model of sandstone reservoirs in different lithologic association of the Middle-Lower Jurassic in Southwest Depression of Tarim Basin

以中一粗砂岩为主，碎屑颗粒分选磨圆较差。成岩早期由于邻近煤层释放的腐殖酸抑制了碳酸盐胶结物的沉淀，使得储集层仅形成少量硅质及高岭石胶结物，并产生较弱的溶蚀作用。在此背景下，机械压实作用相对较强，结构成熟度高的部位保留了一定的原生孔隙。进入成岩中期阶段，薄煤层能够提供一定量的酸性流体来源，同时由于母岩中长石和火山岩岩屑含量较高，易溶组分丰富，形成较多次生孔隙。与此同时，溶蚀作用释放的铝、硅等元素在孔隙中重新沉淀，形成大量高岭石和次生硅质胶结物，对孔隙空间产生一定程度的再充填作用。随着储集层埋藏加深，黏土矿物转化过程中释放的流体以及有机质热演化产生的 CO_2 流体进一步参与成岩反应，使部分孔隙再次被胶结物充填，从而对储集层物性产生一定的负面影响。

组合 C 中的煤层累计厚度大，分布范围广。岩性以中一细砂岩为主，碎屑颗粒结构成熟度普遍较好。其早期成岩过程与组合 B 具有一定相似性，但受控于煤层发育规模的差异，成岩演化中期表现出明显不同，煤层累计厚度较大且砂体多靠近烃源岩沉积区，能够持续提供较为充足的有机酸和 CO_2 等酸性流体，从而增强对长石残余组分及岩屑的溶蚀作用，促进次生溶蚀孔隙的形成与发育。然而，在后期深埋藏阶段，硅质胶结、黏土矿物转化及其他成岩矿物沉淀作用逐渐增强，对部分孔隙空间产生再充填作用，导致储集层物性出现一定程度的降低。基于此，本研究建立了不同岩性组合差异化储集层发育模式(图 12)。

6 结论

1) 塔西南坳陷山前中一下侏罗统按照岩性组合特征可以分为中厚层砂岩夹泥岩(组合 A)、中厚层砂岩夹泥岩—薄煤层(组合 B)和厚层泥岩夹多层薄砂岩—煤层、底部发育辫状河三角洲前缘水下分流通河道砂体(组合 C) 3 种组合样式。

2) 塔西南山前中一下侏罗统的 3 类岩性组合中，组合 A 和组合 B 岩石结构成熟低，组合 C 岩石结构成熟度中等。不同岩性组合成岩作用差异明显，组合 A 压实作用中等，早期方解石胶结强，溶蚀作用弱，原生孔隙发育；组合 B 与组合 C 压实作用较强，胶结作用中等，溶蚀作用强，次生孔隙发育。

3) 聚煤环境决定了煤层和不同岩性组合的空间展布特征，组合 A 和组合 B 主要分布于辫状河三角洲平原相，煤层分布范围和总厚度均较小，连续性相对较差；组合 C 主要分布于滨浅湖—辫状河三角洲前缘相，靠近聚煤中心，煤层总厚度中等且在平面上分布范围较广。岩性和矿物组分影响了砂岩的初始沉积条件及后期成岩演化过程，粒度越粗、塑性岩屑含量越低，储集层物性越好。煤层烃源岩腐殖酸抑制早期碳酸盐胶结，导致压实作用增强，却促进成岩中期有机酸对长石和岩屑的溶蚀，最终使得储集层物性得到相对改善。

参考文献 (References)

- 卞正富, 张益东, 王猛, 王长申, 韩晓彤, 牟守国, 任清晨, 李国栋. 2024. 新疆煤炭资源开发潜力与开发策略. 煤炭学报, 49(2): 967–977. [Bian Z F, Zhang Y D, Wang M, Wang C S, Han X T, Mu S G, Ren Q C, Li G D. 2024. Research on the potential and strategy for coal resources exploitation in Xinjiang. Journal of China Coal Society, 49(2): 967–977]
- 陈汉林, 李康, 李勇, 吴鸿翔, 程晓敢, 曾昌民, 师骏, 张欲清. 2018. 西昆仑山前冲断带的分段变形特征及控制因素. 岩石学报, 34(7): 1933–1942. [Chen H L, Li K, Li Y, Wu H X, Cheng X G, Zeng C M, Shi J, Zhang Y Q. 2018. The segmentation deformation of the thrust belt in front of Western Kunlun, western China, and its controlling factors. Acta Petrologica Sinica, 34(7): 1933–1942]
- 董尧, 朱世发, 崔航, 索义虎, 佟欢, 马维泽, 陈才. 2025. 塔西南山前地区侏罗系物源特征与沉积演化. 沉积学报, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.022. [Dong Y, Zhu S F, Cui H, Suo Y H, Tong H, Ma W Z, Chen C. 2025. Provenance characteristics and sedimentary evolution of the Jurassic in the Pi-edmont Area, SW Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.022]
- 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 刘曾勤, 张殿伟, 冯动军, 邢凤存, 杜伟, 陈刚, 杨帆, 孙川翔. 2022. 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向. 石油与天然气地质, 43(5): 1013–1023. [Guo X S, Zhou D H, Zhao P R, Liu Z Q, Zhang D W, Feng D J, Xing F C, Du W, Chen G, Yang F, Sun C X. 2022. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 43(5): 1013–1023]
- 久博, 黄文辉, 王雅婷, 陈晶, 吕晨航, 梁飞. 2018. 鄂尔多斯盆地南部煤系致密砂岩胶结作用对储层物性的影响. 煤炭学报, 43(9): 2543–2552. [Jiu B, Huang W H, Wang Y T, Chen J, Lü C H, Liang F. 2018. Effect of coal-measure tight sandstone cementation on reservoir physical property in the south of Ordos Basin. Journal of China Coal Society, 43(9): 2543–2552]
- 黎立, 孙春燕, 董尧, 罗强, 屈洋, 朱世发. 2025. 塔西南山前地区甫沙

- 断陷侏罗系物源与沉积相. 古地理论, 27(4): 870-885. [Li L, Sun C Y, Dong Y, Luo Q, Qu Y, Zhu S F. 2025. Provenance and sedimentary facies of the Jurassic in Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 27(4): 870-885]
- 李国欣, 贾承造, 赵群, 周天琪, 高金亮. 2025. 煤岩气成藏机理与煤系全油气系统. 石油勘探与开发, 52(1): 29-43. [Li G X, Jia C Z, Zhao Q, Zhou T Q, Gao J L. 2025. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 29-43]
- 李文厚. 1998. 塔西南坳陷侏罗系的扇三角洲沉积. 沉积学报, 16(2): 150-154. [Li W H. 1998. Fan delta deposits in Jurassic in the depression of the SW Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 150-154]
- 李艳霞, 张华, 田毓峰. 2015. 煤系烃源岩与石英次生加大边的形成机理探讨: 以鄂尔多斯盆地东部山西组为例. 地质科技情报, 34(6): 65-69. [Li Y X, Zhang H, Tian Y F. 2015. Formation mechanism of coal source rocks and quartz overgrowths: an example of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 34(6): 65-69]
- 刘军, 田雷, 杨丽莎, 代冬冬, 张继娟. 2023. 塔里木盆地塔西南坳陷古生界成藏条件特殊性与油气勘探意义. 天然气工业, 43(9): 61-72. [Liu J, Tian L, Yang L S, Dai D D, Zhang J J. 2023. Particularity of Paleozoic hydrocarbon accumulation conditions in the Southwest Tarim Depression and its implications for petroleum exploration. *Natural Gas Industry*, 43(9): 61-72]
- 孟祥超, 窦洋, 宋兵, 陈扬, 陈希光, 李亚哲, 彭博, 易俊峰. 2022. 煤层成因类型及对煤系砂砾岩孔隙演化的控制作用: 以准噶尔盆地玛湖地区侏罗系八道湾组为例. 天然气地球科学, 33(11): 1768-1784. [Meng X C, Dou Y, Song B, Chen Y, Chen X G, Li Y Z, Peng B, Yi J F. 2022. Genetic type of coal seams and its control on pore evolution of coal-glutenite: case study of Badaowan Formation in Mahu area, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(11): 1768-1784]
- 宋磊, 王淑萍, 赵妍菲, 孙沛沛, 盛凯. 2025. 煤系地层优质储层特征及成因模式: 以济阳坳陷大王庄地区石炭系太原组为例. 沉积学报, 43(6): 2114-2134. [Song L, Wang S P, Zhao Y F, Sun P P, Sheng K. 2025. Characteristics and genetic model of high-quality reservoir of clastic rocks in coal-bearing strata: a case of the Carboniferous Taiyuan Formation in the dawangzhuang area, Jiyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(6): 2114-2134]
- 孙春燕, 索义虎, 罗强, 崔航, 刘畅, 朱世发, 张飞. 2026. 不同母岩性质砂岩储集层特征及差异研究: 以塔西南山前下侏罗统为例. 古地理论, 28(1): 290-303. [Sun C Y, Suo Y H, Luo Q, Cui H, Liu C, Zhu S F, Zhang F. 2026. Study on characteristics and differences of sandstone reservoirs with different source rock properties: an example from the Lower Jurassic in piedmont area of southwestern Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 28(1): 290-303]
- 孙迪, 谢小敏, 屈洋, 肖七林, 黎立, 陈才, 王张虎. 2024. 塔里木盆地柯克亚地区侏罗系湖相烃源岩地球化学特征: 对古环境和有机质富集的指示意义. 石油实验地质, 46(6): 1312-1322. [Sun D, Xie X M, Qu Y, Xiao Q L, Li L, Chen C, Wang Z H. 2024. Geochemical characteristics of Jurassic lacustrine source rocks in Kekeya area, Tarim Basin: implications for paleoenvironments and organic matter enrichment. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(6): 1312-1322]
- 田继军, 何静, 韦波, 陆星宇. 2018. 塔里木盆地西南缘侏罗系沉积演化及聚煤主控因素研究. 煤炭科学技术, 46(2): 35-44, 102. [Tian J J, He J, Wei B, Lu X Y. 2018. Study on Jurassic sedimentary evolution and main control factors of coal accumulation in southwest margin of Tarim Basin. *Coal Science and Technology*, 46(2): 35-44, 102]
- 王代富, 罗静兰, 陈淑慧, 胡海燕, 马永坤, 李弛, 柳保军, 陈亮. 2017. 珠江口盆地白云凹陷深层砂岩储层中碳酸盐胶结作用及成因探讨. 地质学报, 91(9): 2079-2090. [Wang D F, Luo J L, Chen S H, Hu H Y, Ma Y K, Li C, Liu B J, Chen L. 2017. Carbonate cementation and origin analysis of deep sandstone reservoirs in the Baiyun Sag, Pearl River mouth basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2079-2090]
- 王清华, 杨海军, 李勇, 蔡振忠, 杨宪彰, 徐振平, 陈才, 孙春燕. 2023. 塔西南山前地区恰探 1 井石炭系一二叠系重大突破与勘探前景. 中国石油勘探, 28(4): 34-45. [Wang Q H, Yang H J, Li Y, Cai Z Z, Yang X Z, Xu Z P, Chen C, Sun C Y. 2023. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(4): 34-45]
- 王清华, 徐振平, 张荣虎, 杨海军, 杨宪彰. 2024. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 45(1): 15-32. [Wang Q H, Xu Z P, Zhang R H, Yang H J, Yang X Z. 2024. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 15-32]
- 王粤川, 韦阿娟, 郭颖, 吴庆勋, 李飞. 2017. 渤海海域中侏罗统煤系碎屑岩储层主控因素. 特种油气藏, 24(6): 33-38. [Wang Y C, Wei A J, Guo Y, Wu Q X, Li F. 2017. The main factors controlling the elastic reservoir of Middle Jurassic coal measure in the Bohai Sea area. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 24(6): 33-38]
- 魏巍, 朱筱敏, 国殿斌, 费李莹, 苏惠, 蒋飞虎, 谈明轩, 吴陈冰洁. 2015. 查干凹陷下白垩统砂岩储层碳酸盐胶结物成岩期次及形成机理. 地球化学, 44(6): 590-599. [Wei W, Zhu X M, Guo D B, Fei L Y, Su H, Jiang F H, Tan M X, Wu C. 2015. Carbonate cements in Lower Cretaceous Bayingebi sandstone reservoirs in Chagan Sag, Yin-e Basin: formation phases and formation mechanisms. *Geochimica*, 44(6): 590-599]
- 解巧明, 王震亮, 尹成明, 李清瑶, 廖晓, 赵子龙, 张快乐. 2019. 塔里木盆地西南坳陷英吉沙与皮山地区构造演化特征及对油气成藏的影响. 石油实验地质, 41(2): 165-175. [Xie Q M, Wang Z L, Yin C M, Li Q Y, Liao X, Zhao Z L, Zhang K L. 2019. Tectonic evolution characteristics of Yingjisha and Pishan areas and the influence on petroleum accumulation in the southwest depression, Tarim Basin.

- Petroleum Geology and Experiment, 41(2): 165–175]
- 杨峰, 田继军, 冯烁. 2017. 塔西南中一下侏罗统煤层煤质特征及其控制因素. 新疆有色金属, 40(6): 14–18. [Yang F, Tian J J, Feng S. 2017. Coal quality characteristics and controlling factors of the Middle Lower Jurassic coal seams in southwestern Tarim Basin. Xin Jiang You Se Jin Shu, 40(6): 14–18]
- 杨晓萍, 顾家裕. 2007. 煤系地层中储层基本特征与优质储层的形成与分布. 沉积学报, 25(6): 891–895. [Yang X P, Gu J Y. 2007. General feature of reservoir in coal-bearing formation and distribution of the favorable reservoir. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 891–895]
- 姚海鹏, 李玲, 李文华, 吕伟波. 2019. 不同煤阶控制下的煤系储层物性研究. 煤炭学报, 44(S2): 620–630. [Yao H P, Li L, Li W H, Lü W B. 2019. Reservoir properties of coal measure under the control of different coal rank. Journal of China Coal Society, 44(S2): 620–630]
- 于景维, 张小栓, 祁利祺, 张浩宇, 刘成哲, 唐子健, 初荆硕. 2023. 煤系砂砾岩储层致密化机理: 以准噶尔盆地 AH5 井区八道湾组为例. 中国矿业大学学报, 52(6): 1216–1230. [Yu J W, Zhang X S, Qi L Q, Zhang H Y, Liu C Z, Tang Z J, Chu J S. 2023. Densification mechanism of coal-bearing glutenite reservoirs: an example from Badaowan Formation in AH5 well area, Junggar Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 52(6): 1216–1230]
- 张青青, 刘可禹, 刘太勋, 孙润平, 孟阳. 2021. 碎屑岩储层碳酸盐胶结物成因研究进展. 海相油气地质, 26(3): 231–244. [Zhang Q Q, Liu K Y, Liu T X, Sun R P, Meng Y. 2021. Research status of the genesis of carbonate cementation in clastic reservoirs. Marine Origin Petroleum Geology, 26(3): 231–244]
- 赵慧, 蒯克来, 操应长, 辛红刚, 谈卫东, 李弛. 2025. 致密砂岩岩相组合约束下成岩作用差异及成因: 志靖—安塞地区延长组长 8 油层组. 沉积学报, 43(4): 1507–1521. [Zhao H, Xi K L, Cao Y C, Xin H G, Dan W D, Li C. 2025. Diagenesis Differences and Genesis Constrained by Lithofacies Combinations in Tight Sandstone: Case study of Chang 8 member of the Yanchang Formation in Zhijing-Ansai area. Acta Sedimentologica Sinica, 43(4): 1507–1521]
- 郑浚茂, 应凤祥. 1997. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式. 石油学报, 18(4): 19–24. [Zheng J M, Ying F X. 1997. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata(acid water medium). Acta Petrolei Sinica, 18(4): 19–24]
- 朱筱敏, 葛家旺, 吴陈冰洁, 张向涛, 汪旭东, 李晓燕, 黎明. 2019. 珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素. 石油学报, 40(S1): 69–80. [Zhu X M, Ge J W, Wu C B J, Zhang X T, Wang X D, Li X Y, Li M. 2019. Reservoir characteristics and main controlling factors of deep sandstone in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 40(S1): 69–80]
- 邹才能, 杨智, 朱如凯, 张国生, 侯连华, 吴松涛, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 王岚, 黄金亮, 王淑芳. 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展. 地质学报, 89(6): 979–1007. [Zou C N, Yang Z, Zhu R K, Zhang G S, Hou L H, Wu S T, Tao S Z, Yuan X J, Dong D Z, Wang Y M, Wang L, Huang J L, Wang S F. 2015. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies. Acta Geologica Sinica, 89(6): 979–1007]
- Ehrenberg S N. 1989. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: discussion; compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura Basin, California; discussion. AAPG Bulletin, 73: 1274–1276.
- Li Z Y, Wu X S, Huang Z L, Wu Y F, Yang Y Z, Pan Y S, Wang B R, Wan H F. 2025. Coal-measure tight sandstone reservoir evolution under the control of the depositional-diagenetic process of the Middle–Lower Jurassic Shuixigou Group in Taipei Sag, Turpan–Hami Basin, Northwest China. Progress in Earth and Planetary Science, 12: 72.
- Rempe J, Sobel E R, Kley J, Terbishaliev B, Musiol A, Chen J, Zhou R J. 2022. Geochronology, geochemistry, and geodynamic implications of permo-Triassic back-arc basin successions in the north Pamir, central Asia. Lithosphere, 2022: 7514691.
- Song Z H, Zhang C L, Sargazi M, Hussain Z, Liu X Q, Ye X T, Wang H R. 2024. Carboniferous bimodal volcanic sequences along the Northeastern Pamir: Evidence for back-arc extension due to northward subduction of the Paleo–Tethys. Geological Society of America Bulletin, 136: 3769–3785.
- Yang S F, Bao Z D, Awan R S, Ruan J F, Lin Y B, Shi C Q, Mao S W, Shen J J. 2021. Whether the diagram of intergranular volume versus cementation volume is normative? take “depositional and compositional controls on diagenesis of the mixed siliciclastic-volcaniclastic sandstones: a case study of the Lower Cretaceous in Erennaoer Sag, Erlian Basin, NE China” for example. Journal of Petroleum Science and Engineering, 206: 108414.
- Zhang X J, Fu M Y, Deng H C, Li Z D, Zhao S, Gluyas J G, Ye T R. 2020. The differential diagenesis controls on the physical properties of lithofacies in sandstone reservoirs from the Jurassic Shaximiao Formation, western Sichuan depression, China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 193: 107413.
- Zhang Y C, Qu X Y, Chen X, Zhang H, Wang W M, Miao C S. 2024. Influence of coal rock on tight sandstone reservoirs in coal seam roofs: a case study of the Lower Jurassic in the Taipei sag, Turpan–Hami Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 165: 106887.

(责任编辑 李新坡)