

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*

孙春燕^{1,2,3} 索义虎^{4,5} 罗 强^{1,2,3} 崔 航^{4,5}
刘 畅^{1,2,3} 朱世发^{4,5} 张 飞^{1,2,3}

1 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

2 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000

3 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000

4 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

5 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘 要 塔西南山前下侏罗统发育含煤的辫状河三角洲砂体, 整体勘探程度较低, 不同地区母岩性质和储集层特征差异较大, 严重制约着油气勘探进程。本研究以甫沙地区和阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层为例, 充分利用各种岩矿测试分析手段对母岩性质和储集层差异性进行分析。结果表明: 甫沙地区母岩主要为早元古界变质岩, 储集岩表现为“贫长石、富变质岩岩屑”(Q_{57.3}F_{4.8}R_{37.9})的特点, 塑性岩屑含量高的特征导致后期埋藏压实作用强, 压实减孔量高达 20.11%, 晚期胶结和溶蚀作用弱, 储集空间为少量剩余原生孔隙, 现今孔隙度仅为 8.98%; 阿克陶地区母岩主要为晚古生代—三叠系喷出岩, 储集岩表现为“富长石和喷出岩岩屑”(Q_{33.2}F_{17.5}R_{49.3})的特点, 压实作用较弱, 早期胶结作用强, 易溶组分含量高加之有机酸影响导致溶蚀作用强, 溶蚀增孔量为 4.03%, 粒间和粒内溶孔的发育改善了储集层质量, 现今孔隙度为 12.95%。综合研究认为, 母岩性质导致塔西南山前下侏罗统砂岩储集层岩石学特征、成岩作用强度和成岩演化序列、储集空间类型和孔隙演化过程存在差异。本次研究为塔西南山前侏罗系优质砂岩储集层的预测提供理论支撑。

关键词 塔西南山前 下侏罗统 储集层差异 母岩性质

第一作者简介 孙春燕, 女, 1989 年生, 博士, 高级工程师, 从事地质勘探研究工作。E-mail: schunyan89@163.com。

通讯作者简介 朱世发, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事储集层地质学与沉积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

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

SUN Chunyan^{1,2,3} SUO Yihu^{4,5} LUO Qiang^{1,2,3} CUI Hang^{4,5}
LIU Chang^{1,2,3} ZHU Shifa^{4,5} ZHANG Fei^{1,2,3}

* 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“超深层碎屑岩油气分布规律与区带目标优选”(编号: 2023ZZ14YJ02)共同资助。[Co-funded by Xinjiang Major Science and Technology Project (No. 2025A01009) and the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation “Oil and gas distribution and zone target optimization of ultra-deep clastic rock” (No. 2023ZZ14YJ02)]

收稿日期: 2024-10-08 改回日期: 2025-09-27

1 Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Xingjiang Korla 841000, China

2 R & D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Xingjiang Korla 841000, China

3 Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development,

Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xingjiang Korla 841000, China

4 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

Abstract The braided river delta sandbodies containing coal developed in the Lower Jurassic in the piedmont southwestern Tarim Basin, the overall exploration level is relatively low, with significant differences in the properties of source rocks and reservoir characteristics in different regions, which in turn restricts the oil and gas exploration process. This article takes the sandy reservoirs of the Lower Jurassic in the Fusha and Aketao regions as examples, and fully utilizes various rock and mineral testing and analysis methods to analyze the differences in the properties of the parent rock and reservoirs. The results show that the source rocks in the Fusha area are mainly Early Proterozoic metamorphic rocks. The reservoir exhibits characteristics of “poor feldspar and rich metamorphic rock debris” ($Q_{57.3}F_{4.8}R_{37.9}$), and the high content of plastic debris leads to strong burial compaction in the later stage, with a compaction reduction of up to 20.11%. Late cementation and dissolution were weak. The reservoir space is a small amount of residual primary pores, and the current porosity is only 8.98%. Aketao area is the Late Paleozoic-Triassic extrusive rock, and the reservoir exhibits the characteristics of “rich feldspar and extrusive rock debris” ($Q_{33.2}F_{17.5}R_{49.3}$). The Compaction is weak, and the early cementation is strong, The high content of soluble components and the influence of organic acids lead to strong dissolution, with a dissolution pore increase of 4.03%. The development of intergranular and intragranular dissolution pores improves the reservoir quality, and the current porosity is 12.95%. Comprehensive research suggests that the properties of the parent rock lead to differences in the petrological characteristics, diagenetic intensity, diagenetic evolution sequence, reservoir space types, and pore evolution processes of the Lower Jurassic sandstone reservoirs in the piedmont southwestern Tarim Basin. This study provides theoretical support for the prediction of high-quality sandstone reservoirs in the Jurassic period in the piedmont southwestern Tarim Basin.

Key words piedmont area of southwestern Tarim Basin, Lower Jurassic, reservoir differences, source rock properties

About the first author SUN Chunyan, born in 1988, is a PhD and a senior engineer, is engaged in geological exploration and research work. E-mail: schunyan89@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 researches on reservoir geology and sedimentology. E-mail: zhushifa_zsf@163.com.

塔西南坳陷作为塔里木盆地重要的油气战略接替区,经过 30 多年的勘探,目前已经发现柯克亚凝析气田、巴什托普油田和阿克莫木气田等大型油气田,探明石油地质储量 3000×10^4 t,探明天然气地质储量 1000×10^8 m³ (刘军等, 2023)。2021 年塔西南山前甫沙 8 井侏罗系获得了工业油气流,标志着—套新含油层系出现,证明侏罗系具有一定的

勘探潜力,其砂体分布及储集层特征受到了越来越多的关注 (王清华等, 2024);然而,塔西南侏罗系的研究主要集中在砂体的沉积特征与发育演化模式、成因机制和烃源岩特征等方面 (肖文摇等, 2016;田继军等, 2018)。受限于塔西南山前侏罗系整体勘探程度低、地质资料有限等因素的制约,导致其砂岩储集层特征尚不明确。

母岩性质决定岩石组分特征和砂岩储集层的原始物性,间接影响砂岩成岩作用过程与成岩产物的类型,进一步控制了储集层的质量 (Tiercelin *et al.*, 2004; 罗静兰等, 2014; 李顺利等, 2017; 杜晓峰等, 2017; Gao *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018)。长期的油气勘探开发实践证明,母岩性质的差异对储集层质量有重要的影响,来自高级变质岩和侵入岩母岩的沉积物中刚性颗粒含量高、抗压能力强、砂岩储集层物性好 (马东旭等, 2016; 陈春峰等, 2017); 岩屑和长石等易溶组分为成岩中后期酸性流体溶蚀提供了重要的物质基础,其含量与储集层质量密切相关 (郭帅等, 2017; 卢炳雄等, 2018)。塔西南山前侏罗系砂岩为南部昆仑山与北边麦盖提斜坡供源,具有平面上跨度大、分布范围广和母岩性质差异较大的特点 (黎立等, 2025)。在沉积环境相似条件下,母岩性质的差异对储集层质量有重要的影响;而目前对侏罗系砂岩储集层母岩性质和储集层特征前人未展开系统的研究,侏罗系砂岩储集层母岩性质、成岩作用和储集层质量关联性的研究工作仍较为薄弱,严重影响下一步油气勘探进程。因此,研究不同母岩性质砂岩储集层的成岩特征和孔隙演化过程对于预测储集层质量、提高塔西南山前侏罗系勘探效率具有重要的意义。

本研究基于岩石薄片、阴极发光、扫描电镜和流体包裹体等分析资料,以塔西南山前甫沙和阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层作为研究对象,厘清了不同地区母岩性质、源区构造背景、岩石学特征、成岩作用及孔隙演化的差异,分析母岩性质对砂岩储集层的影响。该研究对于深入理解砂岩储集层在差异性沉积—成岩演化过程中发生的流体—岩石相互作用、砂岩致密化机理和寻找更多的优质储集层,具有重要的理论意义。

1 区域地质概况

塔西南坳陷位于塔里木盆地西南缘,面积约为 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$,是塔里木盆地中央隆起和昆仑山之间的一级构造单元;塔西南山前主要包括西昆仑山前冲断带、西南天山山前冲断带、喀什凹陷和叶城—和田凹陷 4 个二级构造单元 (王清华等, 2023) (图 1-A, 1-B)。

研究区集中在西昆仑山前冲断带,包括甫沙地

区和阿克陶地区 (图 1-A)。甫沙地区位于西昆仑山前冲断带东南部,阿克陶地区则位于西昆仑山前冲断带西北部。侏罗系自下而上发育莎里塔什组、康苏组、杨叶组、塔尔杂组和库孜贡苏组,本研究目的层段为下侏罗统莎里塔什组和康苏组 (图 1-C)。塔西南三叠纪末强烈的造山活动在山前形成了多排冲断带,研究区侏罗系以“填平补齐”的方式接受沉积,下侏罗统以冲积扇—扇/辫状河三角洲为主,其中辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体是主要储集层;除此之外,湖水频繁进退导致该时期发育优质的碳质泥岩和煤系储集层,可见砂岩储集层与煤系烃源岩互层。甫沙地区和阿克陶地区埋藏史资料显示侏罗系储集层前期均经历了渐进深埋;中新世至今受印度板块与青藏高原板块碰撞远程效应的影响发育前陆盆地;早中新世西昆仑山开始持续挤压隆升,导致阿克陶地区侏罗系抬升至地表,甫沙地区发生强烈的构造推覆使山前冲断带形成叠瓦状、断弯背斜、三角带等构造样式 (廖晓等, 2018; 解巧明等, 2019; 王清华等, 2023; 李超等, 2023)。

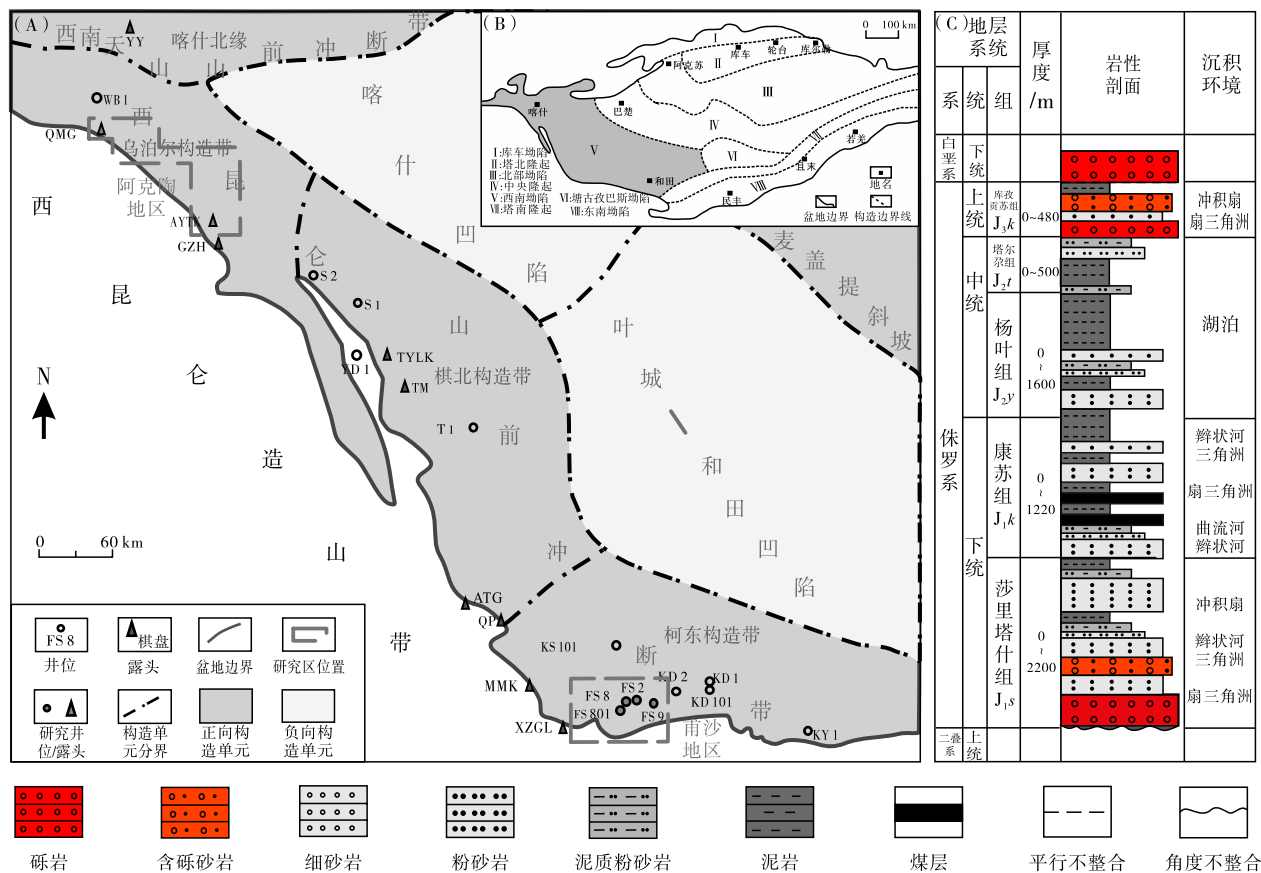
2 实验样品与分析方法

针对塔西南山前下侏罗统砂岩储集层特征,选择甫沙地区 4 口井 (FS8、FS2、FS801、FS9) 的 62 块砂岩样品,阿克陶地区 2 个剖面 (AYTK、QMG) 的 21 块砂岩样品一起展开对比研究;统计了 2 个剖面的 304 块砾石特征。开展的分析测试项目包括铸体薄片、扫描电镜 (SEM)、阴极发光和流体包裹体。其中铸体薄片、扫描电镜 (SEM) 和阴极发光是在中国石油大学 (北京) 油气资源与探测国家重点实验室完成,岩石铸体薄片在奥林巴斯 BX15 型偏光显微镜下进行观察和拍照;CLF-2-阴极发光仪在电压 14.5 kV、电流 320~350 μA 条件下进行观察和拍照;扫描电镜所用仪器为 Phenom XL G2。流体包裹体是在北京中科矿研检测技术有限公司完成,均一温度测试使用 (LINKAM THMS 600) 型显微冷热台,均一温度测试精度为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$,最终冰点温度的精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3 母岩性质及岩石学特征差异

3.1 砾石与岩屑特征

阿克陶地区的 QMG 和 AYTK 剖面有充足的砾



A—塔西南山前构造单元划分、井位及剖面分布；B—塔西南坳陷地理位置；C—地层综合柱状图

图 1 塔西南坳陷地理位置及地层综合柱状图 (据曾庆鲁等, 2020; 有修改)

Fig. 1 Comprehensive histogram of geographical location and stratigraphy of Taxinan Depression (modified from Zeng *et al.*, 2020)

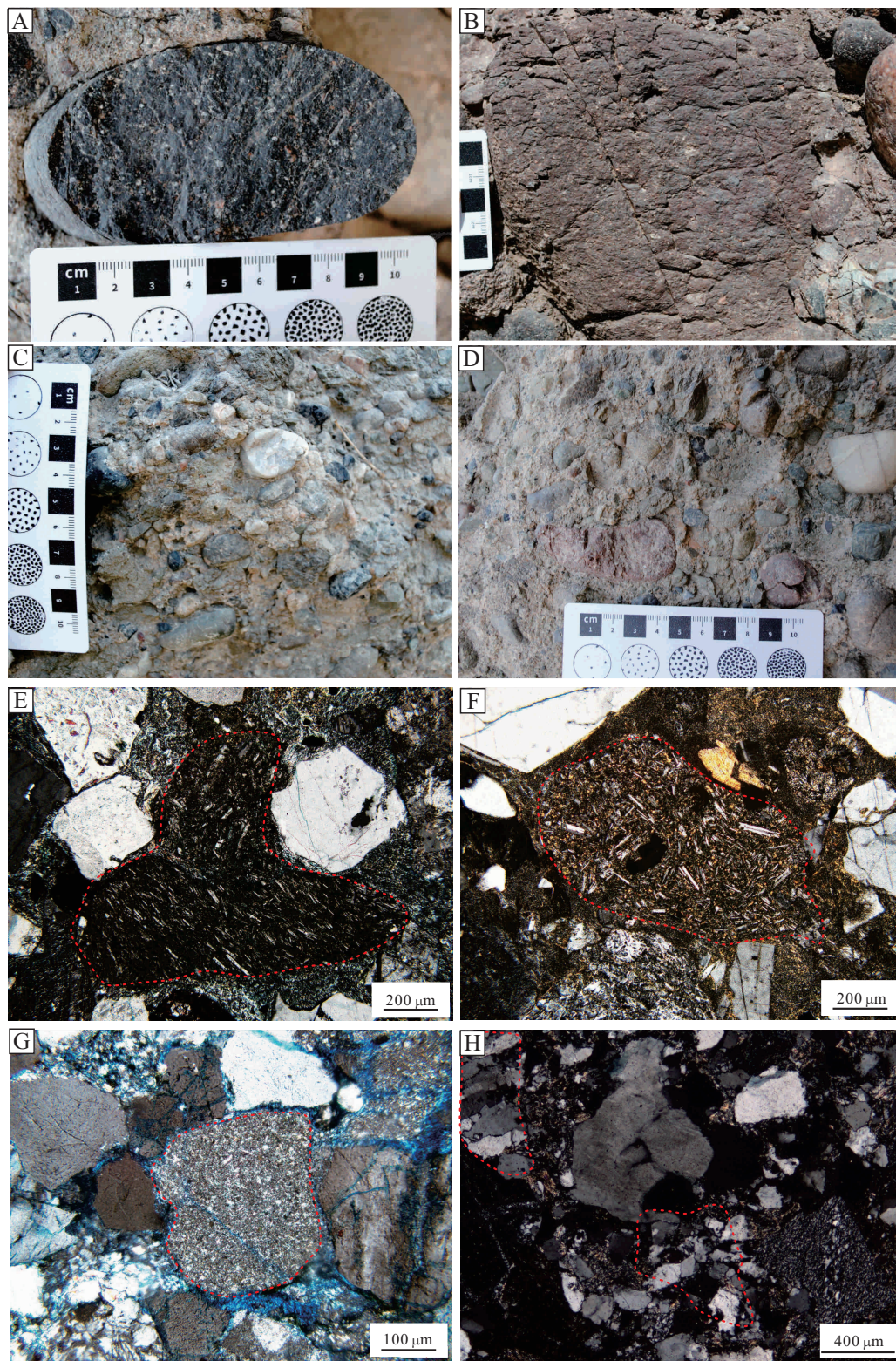
岩资料可供观察和分析, 砾岩通常分布在盆地边缘且保存大量的源区信息, 砾岩中的砾石成分和种类能直接反映母岩类型 (蔚远江等, 2020)。QMG 剖面砾石的平均粒径为 15 cm, 磨圆度为圆状一次圆状 (图 2-A, 2-B), AYT 剖面的砾石平均粒径为 3 cm (图 2-C, 2-D); 在野外露头可观察到玄武岩、安山岩和花岗岩的砾石, 整体分选较差。研究区薄片统计数据表明 (图 3), 阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层镜下见大量的喷出岩岩屑, 包括安山岩和玄武岩岩屑等 (图 2-E 至 2-G), 变质岩岩屑和沉积岩岩屑含量相对较少; 然而甫沙地区多为变质岩岩屑 (图 2-H), 岩浆岩岩屑和沉积岩岩屑含量较少。

3.2 构造背景

沉积盆地内沉积物的碎屑组分与物源区的大地构造性质和构造环境有着密切联系 (朱世发等, 2021)。通过甫沙和阿克陶地区薄片数据统计, 本

研究利用 Dickinson 三角形图解恢复沉积物源区的构造背景, Qt-F-L 和 Qm-F-Lt 三角图结果显示甫沙地区样品点主要分布在再旋回造山带物源区, 阿克陶地区样品点分布在火山弧物源区和再旋回造山带物源区; Qp-Lv-Ls 三角图显示甫沙地区样品点主要分布在混合造山带砂岩物源区, 阿克陶地区样品点主要分布在火山弧造山带和混合造山带物源区; Qm-P-K 图显示所有的样品点分布在大陆块物源区 (图 4)。由此可知, 甫沙地区和阿克陶地区下侏罗统源区的构造背景差异明显, 甫沙地区属于混合造山带, 与西昆仑山造山带的构造背景一致; 阿克陶地区的源区构造背景包括火山弧造山带和混合造山带, 古生代该地区存在一个火山岛弧与西昆仑山拼合, 与源区构造背景相吻合。

前人研究发现, 原特提斯洋的闭合导致早古生代岩浆岩和晚元古代变质岩在西昆仑造山带分布 (刘成军, 2015; Zhu *et al.*, 2021; 陶再礼等, 2022); 而在北帕米尔东北部即临近阿克陶地区形



A—玄武岩砾石, QMG 剖面, J_1s ; B—安山岩砾石, QMG 剖面, J_1s ; C—砾岩, 成分复杂, AYTK 剖面, J_1s ; D—砾岩, 成分复杂, AYTK 剖面, J_1s ; E—安山岩岩屑, QMG 剖面, J_1s , 蓝色铸体; F—玄武岩岩屑, QMG 剖面, J_1s , 正交偏光, 蓝色铸体; G—隐晶岩岩屑, AYTK 剖面, J_1s , 正交偏光, 蓝色铸体; H—石英岩岩屑, FS9 井, 5124 m, 正交偏光, 蓝色铸体

图 2 塔西南山前下侏罗统砾岩露头 and 岩屑类型典型照片

Fig. 2 Typical photos of the Lower Jurassic conglomerate outcrops and rock debris types in piedmont area of southwestern Tarim Basin

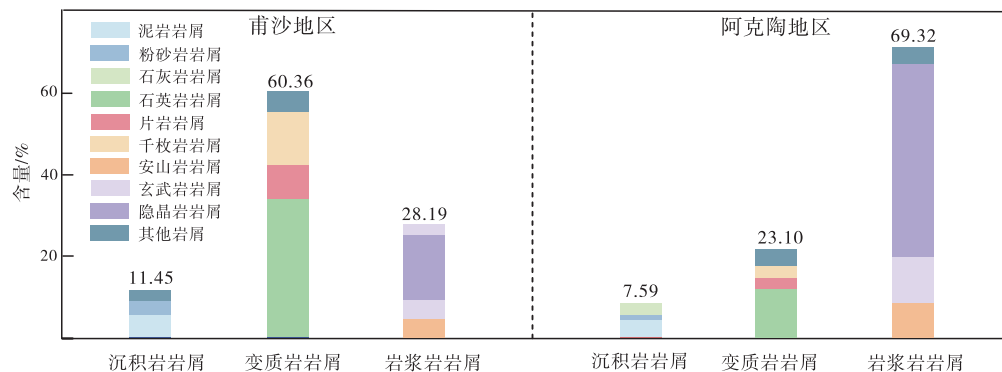


图 3 塔西南山前下侏罗统岩屑相对含量统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of rock debris relative content in the Lower Jurassic in piedmont area of southwestern Tarim Basin

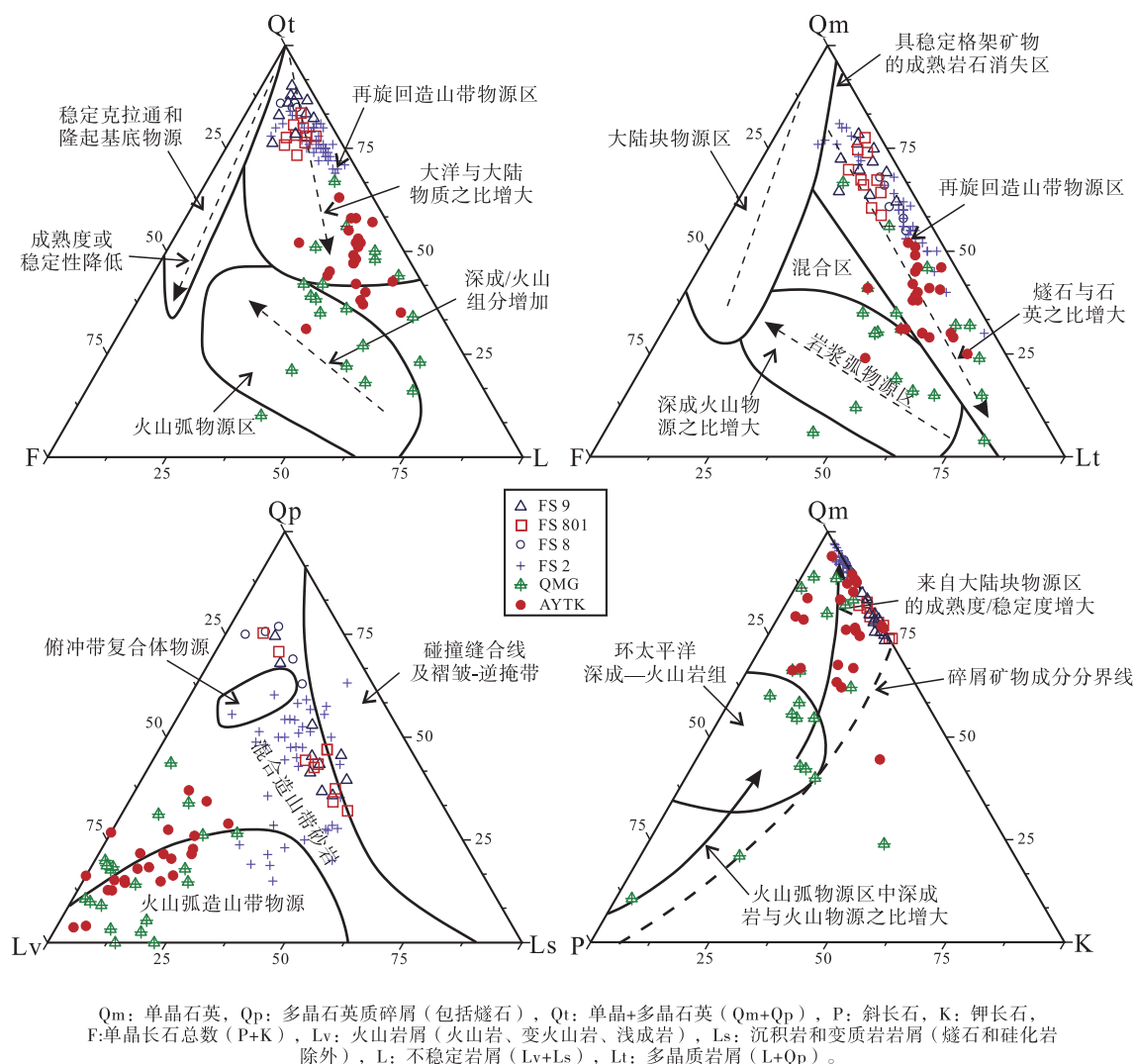


图 4 塔西南山前甫沙和阿克陶地区下侏罗统砂岩组分物源判别图版

Fig. 4 Source discrimination diagram of the Lower Jurassic sandstone components in Fusha and Aketao areas of piedmont southwestern Tarim Basin

成了大面积分布的晚古生代—三叠纪喷出岩，该喷出岩则与古特提斯洋俯冲密切相关 (Rembe *et al.*,

2022; Song *et al.*, 2024)。综合研究区砾石和岩屑特征、构造背景和区域母岩岩体分布特征，认为甫

沙地区母岩主要为元古界变质岩, 含少量的早古生代岩浆岩和二叠系沉积岩; 阿克陶地区且木干剖面莎里塔什组砾石与石炭系乌鲁阿特组大洋底火山喷发环境形成的灰绿色枕状玄武岩、杏仁状玄武岩、安山玄武岩等岩性特征相似, 因此母岩主要为晚古生代—三叠系喷出岩, 含少量变质岩和石炭系—二叠系的沉积岩。

3.3 岩石学特征

甫沙地区下侏罗统薄片样品来自辫状河三角洲前缘或扇三角洲前缘砂体, 阿克陶地区下侏罗统样品来自辫状河三角洲平原和冲积扇扇缘砂体, 甫沙地区与阿克陶母岩性质、源区构造背景和搬运距离对研究区碎屑组成产生重要影响。

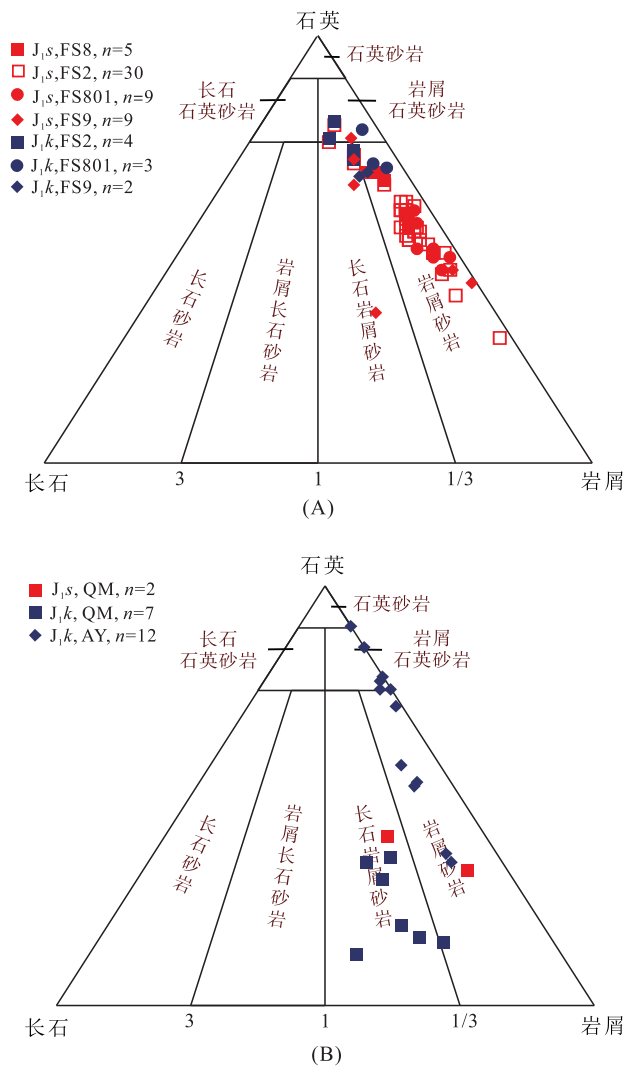
对甫沙地区 62 张和阿克陶地区 21 张岩石薄片鉴定数据统计可知, 甫沙地区下侏罗统岩石类型主要为岩屑砂岩, 发育极少量的岩屑石英砂岩 (图 5-A), 平均组分为 $Q_{57.3} F_{4.8} R_{37.9}$; 部分石英颗粒在正交偏光下显示明显的波状消光; 长石中钾长石含量占据总量 95% 以上, 斜长石含量极低; 岩屑主要为变质岩岩屑 (如石英岩岩屑等); 碎屑颗粒磨圆以次棱—次圆状为主, 分选整体中等, 颗粒间多为点—线接触。阿克陶地区主要为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩 (图 5-B), 平均组分为 $Q_{33.2} F_{17.5} R_{49.3}$; 石英颗粒边缘具有溶蚀港湾状或具有六方双锥形的直边, 正交光下可见突变消光; 长石含量与甫沙地区相比含量较高, 其中斜长石比重增加, 占据总含量的 45% 以上; 岩屑主要为岩浆岩岩屑 (如喷出岩岩屑、隐晶岩岩屑), 沉积岩岩屑含量最少 (泥岩岩屑、碳酸盐岩岩屑); 碎屑颗粒磨圆以次棱状和次圆—次圆状为主, 分选整体差—中等, 颗粒间多为线接触。

4 成岩作用差异

甫沙地区和阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层有着不同的母岩性质和碎屑组合, 导致 2 个地区下侏罗统储集层在成岩作用上也必然存在一定的差异。

4.1 压实作用

压实作用是造成砂岩储集层原生孔隙减少的最主要的原因 (Zhu *et al.*, 2020)。压实作用使塑性碎屑颗粒发生塑性变形、吸水膨胀和假杂基化。阿

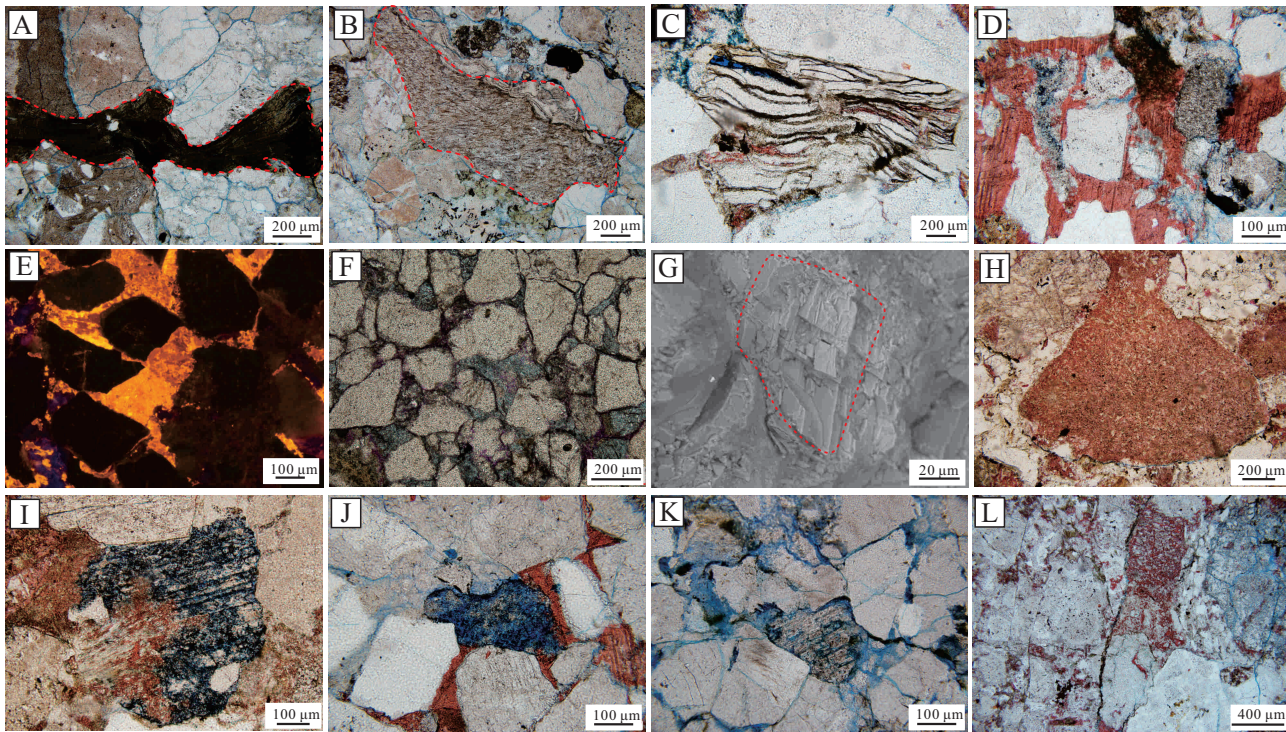


A—甫沙地区砂岩分类三角图; B—阿克陶地区砂岩分类三角图

图 5 塔西南山前下侏罗统砂岩分类三角图

Fig. 5 Triangle diagram of classification of the Lower Jurassic sandstones in piedmont area of southwestern Tarim Basin

克陶地区主要为云母颗粒 (图 6-A)、蚀变的喷出岩岩屑 (图 6-B, 6-C), 整体塑性碎屑颗粒含量介于 3%~16% 之间, 平均值为 5%; 甫沙地区塑性碎屑颗粒主要为云母颗粒、片岩等岩屑, 塑性含量介于 4%~15% 之间, 平均值为 8%。相比之下, 甫沙地区塑性碎屑颗粒含量较高, 常见云母、片岩岩屑在机械压实作用下发生弯曲、伸长或被硬碎屑嵌入, 现今岩石碎屑以线—凹凸接触为主, 镜下剩余原生孔发育程度较低且连通性较差。母岩性质不同使甫沙和阿克陶地区塑性碎屑颗粒类型及含量存在差异, 最终体现在 2 个地区碎屑岩抗压能力的强弱。此外, 压实作用差异还与埋藏深度、早期胶结



A—黑云母压实变形, QMG 剖面, J_1s , 单偏光; B—喷出岩岩屑压实变形, QMG 剖面, J_1s , 单偏光; C—喷出岩岩屑压实变形, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光; D—早期方解石连晶胶结被茜素红染色后显示红色, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; E—方解石发橙黄色光, AYTK 剖面, J_1k , 阴极发光; F—铁白云石胶结物被染为蓝色, FS2 井, 5006 m, 单偏光, 红色铸体; G—铁白云石胶结物菱面集合体, FS2 井, 5006 m, 扫描电镜; H—灰岩岩屑, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 茜素红染色; I—长石颗粒溶蚀, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; J—岩屑内部被溶蚀, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; K—长石颗粒溶蚀, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; L—方解石交代岩屑颗粒, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体

图 6 塔西南山前下侏罗统成岩作用典型照片

Fig. 6 Typical photos of the Lower Jurassic diagenesis in piedmont area of southwestern Tarim Basin

和煤层腐殖酸有关。

4.2 胶结作用

研究区下侏罗统砂岩储集层中胶结作用类型丰富, 占据大量的储集空间, 是储集层致密化的关键因素之一, 胶结物主要为碳酸盐、硅质和自生黏土矿物等。

4.2.1 碳酸盐胶结

研究区目的层砂岩储集层中碳酸盐胶结物以方解石、铁白云石为主, 平均含量分别为 1.47%、2.27%, 铁方解石和白云石含量较少; 碳酸盐胶结物具有总体含量较低、局部富集的特征。其中, 方解石胶结物呈连晶型和孔隙型胶结方式充填孔隙(图 6-D), 阴极发光下发橙黄色光(图 6-E), 指示方解石胶结发生于沉积后不久且埋藏尚浅的早成岩阶段。铁白云石多以分散的晶体充填粒间孔隙

(图 6-F), 强烈交代石英骨架颗粒边缘, 扫描电镜下多呈块状自形菱面集合体(图 6-G)。甫沙和阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层中碳酸盐胶结物类型和含量差别较大, 甫沙地区以铁白云石胶结为主, 平均含量为 2.32%, 早期碳酸盐胶结物含量极少; 而阿克陶地区主要为方解石胶结物, 平均含量为 6.14%。

本次实验的盐水包裹体样品均来自阿克陶地区方解石胶结物, 呈现气—液两相, 显微镜下为浅灰色, 直径介于 $2 \sim 18 \mu\text{m}$ 之间, 形态多呈圆形和椭圆形等; 均一温度主要介于 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间(图 7)。

结合流体包裹体实验和薄片观察结果, 甫沙地区镜下可见裂缝充填铁白云石, 该现象可能与成岩中后期强烈的构造活动有关, 断层沟通的下伏二叠系碳酸盐岩溶解流体为侏罗系砂岩储集层提供物质来源。阿克陶地区流体包裹体结果显示方解石胶结

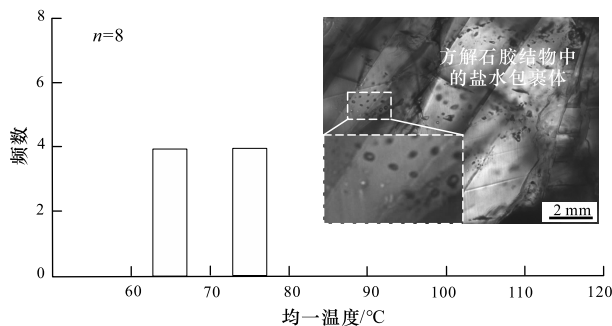


图 7 阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层流体包裹体及均一温度特征

Fig. 7 Fluid inclusions and uniform temperature characteristics of the Lower Jurassic sandstone reservoirs in Aketao area

物主要形成于早成岩阶段 A 期。此外, 研究区碳酸盐胶结物钙离子来源存在差异, 前人研究认为碳酸盐的钙来源主要与钙长石的溶解、碳酸盐岩岩屑溶解及铝硅酸盐的水化作用等因素有关 (尤丽等, 2012; 张青青等, 2021); 受母岩性质影响, 阿克陶地区长石和火山岩岩屑含量较高, 并且含有少量的碳酸盐岩岩屑 (图 6-H), 本研究认为钙长石和碳酸盐岩岩屑的溶解为阿克陶地区碳酸盐胶结物提供了一定的钙源。除此之外, 煤层的发育程度影响碳酸盐胶结物的生成, 阿克陶地区下侏罗统中煤层的累计厚度普遍小于 0.5 m, 而甫沙地区煤层的累计厚度普遍大于 10 m; 早成岩阶段甫沙地区紧邻煤层的砂岩储集层受腐殖酸影响, 缺少早期方解石胶结物。母岩和极少量煤层腐殖酸导致阿克陶地区碳酸盐胶结物含量较高; 相比之下, 甫沙地区缺少钙长石等碎屑颗粒溶解提供钙源、煤层累计厚度大, 因此碳酸盐胶结物整体含量较小。

4.2.2 硅质胶结

塔西南山前下侏罗统砂岩储集层硅质胶结表现为镜下见次生加大边和自生石英微晶。受母岩性质影响, 阿克陶地区的长石含量较多, 它的溶解为硅质胶结物提供了大量的物质来源; 甫沙地区碎屑颗粒之间以线接触为主, 压溶作用为石英的次生加大提供物质来源, 石英次生加大围绕碎屑石英颗粒边缘分布, 多为 1 期或 2 期加大边。研究区目的层硅质胶结物含量普遍较低, 与前人认为煤系地层中硅质胶结程度较高的观点不同, 推测石英自身加大受到抑制。

4.2.3 其他类型胶结

储集层中自生黏土矿物主要为高岭石, 多与长

石溶蚀相伴生; 绿泥石、伊利石和伊蒙混层矿物含量相对较少。

4.3 溶蚀作用和交代作用

溶蚀作用对塔西南山前下侏罗统砂岩储集层物性具有明显的改善, 常见长石、岩屑和方解石被酸性流体溶蚀等 (图 6-I, 6-J)。镜下可见岩屑颗粒溶蚀形成不规则的蜂窝状粒内溶孔, 整个岩屑颗粒全部被溶蚀形成的铸模孔, 酸性流体沿长石解理缝溶蚀形成网络状溶蚀孔隙 (图 6-K) 等现象。面孔率统计结果显示, 甫沙地区下侏罗统砂岩储集层溶蚀面孔率介于 0%~0.2% 之间; 阿克陶地区溶蚀面孔率介于 0.2%~3.1% 之间, 储集层整体溶蚀作用较强。三叠系的岩浆岩母岩为阿克陶地区提供了大量的长石、岩屑等易溶颗粒, 在成岩过程中, 长石和岩浆岩岩屑等易溶颗粒被后期有机酸和大气淡水溶蚀, 更易形成优质储集层; 甫沙地区长石等易溶颗粒含量较少, 溶蚀作用较弱。研究区母岩性质决定易溶组分类型和含量, 最终影响溶蚀作用的强弱。煤层腐殖酸的溶蚀作用主要发生于早成岩阶段, 由于后期砂岩储集层最大埋深较大, 压实作用和胶结作用强烈, 导致腐殖酸溶蚀产生的次生孔隙难以保存。

交代作用常见方解石交代岩屑颗粒 (图 6-L), 对研究区砂岩储集层质量影响不大。

4.4 成岩期次与演化序列

依据碎屑岩成岩阶段划分标准 (SY/5477-2003), 结合有机质成熟度 (镜质体反射率)、自生矿物特征、黏土矿物组合及 I/S 混层中 S 层的混层比等指标对塔西南山前下侏罗统砂岩储集层成岩阶段进行划分。甫沙地区下侏罗统现今储集层最大埋深超过 3500 m, 地层温度接近 120 °C; 镜质体反射率介于 0.53%~0.66% 之间, 最高热解值温度介于 424~447 °C 之间, 有机质处于成熟阶段; 伊/蒙混层中蒙皂石含量介于 20%~30% 之间, 反映砂岩储集层整体处于中成岩 A₂ 期。阿克陶地区下侏罗统储集层地质历史中最大埋深超过 4500 m, 地层温度接近于 140 °C; 镜质体反射率介于 0.64%~1.88% 之间, 最高热解值温度介于 440~505 °C 之间, 有机质处于成熟—高成熟阶段, 可知阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层最高处于中成岩 B 期, 之后抬升至地表的处于表生阶段。

根据前文所述矿物之间充填、切割、交代现象以及矿物的形成条件，结合研究区目的层埋藏史与热演化史，恢复成岩演化序列。甫沙地区下侏罗统成岩序列如下：压实作用—腐殖酸排酸/极少量长石溶蚀/第 1 期石英次生加大/无序伊蒙混层—极少量早期方解石胶结—渐进深埋/有机酸排酸/少量长石、岩屑溶蚀/自生高岭石/第 2 期石英次生加大/有序伊蒙混层—构造挤压/晚期铁白云石胶结/少量微裂缝（图 8-A）。阿克陶地区下侏罗统成岩演化序列如下：压实作用—少量腐殖酸排酸/第 1 期石英次生加大/第 1 期方解石胶结/无序伊蒙混层—渐进深埋/有机酸排酸/长石+岩屑溶蚀/自生高岭石/第 2 期石英次生加大/有序伊蒙混层—第 2 期（铁）方解石胶结—构造抬升至地表/少量微裂缝/大气淡水溶蚀（图 8-B）。

5 储集空间类型及孔隙演化差异

5.1 储集空间类型

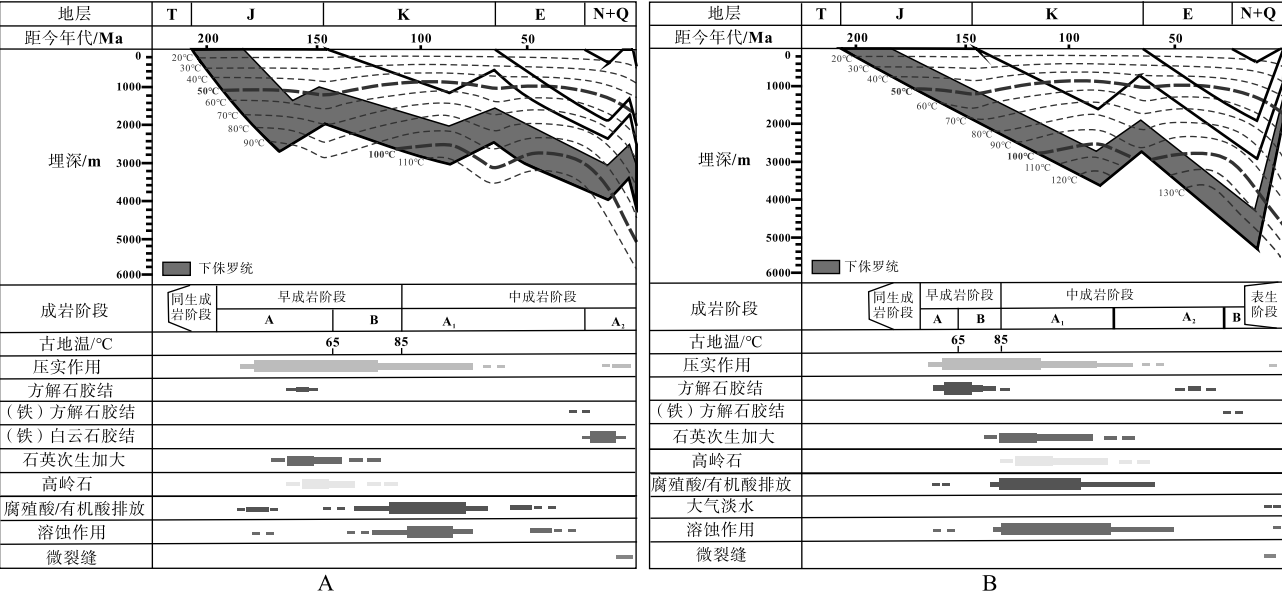
铸体薄片统计结果表明，阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层平均面孔率（2.73%）高于甫沙地区（2%）。阿克陶地区目的层储集空间以次生孔隙为主，占据全部孔隙的 45%，镜下表现为长石等不稳定碎屑颗粒溶蚀形成的粒内溶孔、基质溶蚀形成的粒间溶孔（图 9-A 至 9-C）；偶见高岭石晶间孔，

其孔径小，孔隙连通性较差；裂缝多为构造缝，具有一定的方向性，呈贯穿状、垂直或斜交层理方向。然而，甫沙地区目的层储集空间类型以原生孔隙为主，占据全部孔隙的 40%，原生孔隙镜下多为胶结后未完全堵塞、形态规则的剩余原生粒间孔（图 9-D 至 9-F）；偶见微孔隙，多为泥质杂基成岩收缩形成，孔径在 0.05~0.5 μm 之间；少见次生孔隙和裂缝。通过铸体薄片观察发现，不同母岩性质对应沉积区的储集层面孔率和储集空间类型差异明显，阿克陶地区易溶组分含量较多，在成岩演化过程中酸性流体对易溶组分进行选择性地溶蚀，有效增加了骨架颗粒内部的孔隙体积，导致最终的总面孔率较甫沙地区高。

5.2 孔隙演化

本次研究采用“反演回剥法”，对储集层在地质历史演化过程中的孔隙度变化进行恢复。在计算过程中，认为塔西南下侏罗统砂岩储集层压实、胶结和溶蚀作用相对独立，且压实损失孔隙度、胶结损失孔隙度和溶蚀次生孔隙度在时间上存在着先后顺序。

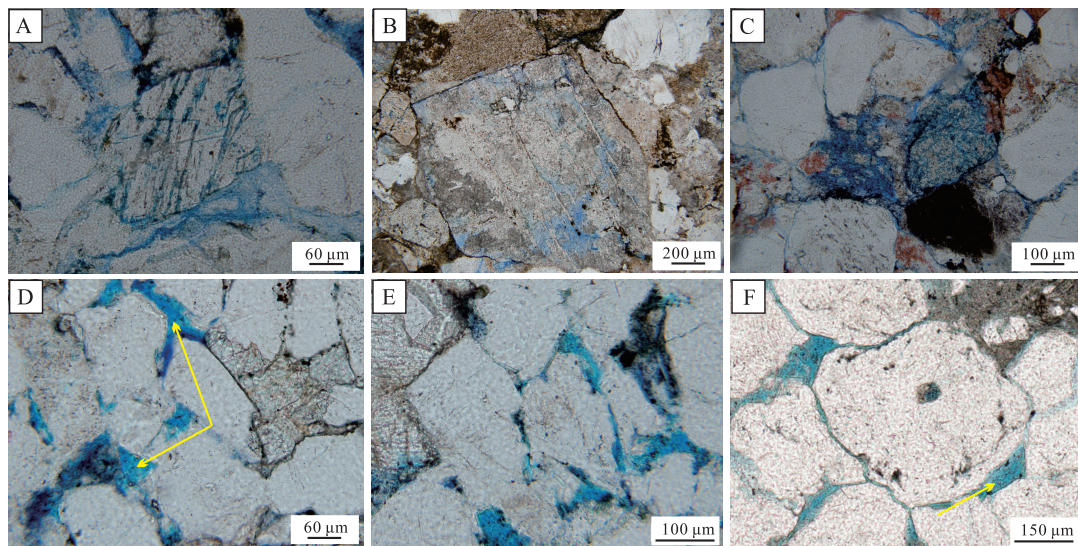
在埋藏演化过程中，储集层经历了成岩改造，储集层孔隙度大小在不同成岩演化阶段表现具有明显差异。综合分析研究区埋藏史、热演化史和成岩演化史，结合构造背景和母岩性质差异，建立了甫



A—甫沙地区 FS8 井下侏罗统砂岩储集层成岩序列；B—阿克陶地区 AYTK 剖面下侏罗统砂岩储集层成岩序列。

图 8 塔西南山前下侏罗统砂岩储集层成岩序列

Fig. 8 Diagenetic sequence of the Lower Jurassic sandstone reservoir in piedmont area of southwestern Tarim Basin



A—长石解理缝溶蚀孔隙和粒间溶孔, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; B—岩屑粒内溶孔, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; C—岩屑粒内溶孔, AYTK 剖面, J_1k , 单偏光, 蓝色铸体; D—剩余原生孔隙, FS2 井, 5006 m, 单偏光, 蓝色铸体; E—剩余原生孔隙和少量粒间溶蚀孔隙, FS2 井, 5006 m, 单偏光, 蓝色铸体; F—剩余原生孔隙, FS801 井, 3156 m, 单偏光, 蓝色铸体

图 9 塔西南山前下侏罗统砂岩储集层储集空间类型照片

Fig. 9 Photos of reservoir space types of the Lower Jurassic sandstone reservoirs in piedmont area of southwestern Tarim Basin

沙和阿克陶地区侏罗系储集层孔隙的定量演化模式 (图 10)。

5.2.1 早期机械压实和胶结作用阶段

由上文可知, 研究区构造背景存在明显差异, 甫沙地区属于混合造山带, 母岩主要为元古界变质岩; 阿克陶地区则属于火山弧造山带和混合造山带, 母岩主要为晚古生代—三叠纪喷出岩。母岩性质决定了不同地区的岩石学特征, 甫沙地区表现为“贫长石、富变质岩岩屑”的特点, 阿克陶地区表现为“富长石和喷出岩岩屑”的特点。

沉积初期, 研究区下侏罗统辫状河三角洲前缘水下分流河道水动力较强, 岩石的结构成熟度中等, 砂岩的原始孔隙度普遍较高, 由公式可得 (Gao *et al.*, 2020) 甫沙和阿克陶地区初始孔隙度平均值分别为 31.62%、30.85%。受断陷活动的影响, 在距今 180—170 Ma, 研究区下侏罗统储集层均经历快速埋藏, 深度普遍大于 1500 m, 该时期压实作用是孔隙度减小的主要原因, 甫沙和阿克陶地区压实损失孔隙度平均值分别为 20.11% 和 13.57%。甫沙地区压实作用较强, 这与其高塑性颗粒的含量 (云母颗粒、泥岩岩屑和片岩岩屑) 和煤层腐殖酸有关。阿克陶地区塑性岩屑 (云母颗粒、蚀变的喷出岩岩屑) 含量较低, 导致其压实减孔量小, 颗粒之间呈现点一线接触。

随后, 甫沙地区下侏罗统砂岩储集层经历构造抬升, 沉降速度减小, 受煤层腐殖酸影响, 缺少早期方解石胶结物, 因此碳酸盐胶结减孔量小。阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层经历持续渐进深埋, 广泛发育早期碳酸盐胶结物, 还发育少量黏土矿物, 强烈的胶结作用造成原生孔隙进一步损失, 严重破坏储集层物性。

5.2.2 溶蚀阶段和后期胶结阶段

在 120 Ma 以来, $R_0 > 0.5\%$, 研究区下侏罗统砂岩储集层均进入渐进深埋阶段, 储集层的成岩演化也进入到 A_1 期。该时期侏罗系内部烃源岩开始释放有机酸, 阿克陶地区晚古生代—三叠纪喷出岩为砂岩储集层提供了大量可溶物质, 酸性流体对长石和岩屑进行溶蚀, 溶蚀增加孔隙度平均值为 4.03%; 而甫沙地区缺少提供长石等易溶颗粒的母岩, 导致其溶蚀增孔量仅为 1.78%。此外, 随着酸性条件下地层水中的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 过饱和, 研究区发育硅质和高岭石胶结物并且充填粒间溶孔和残余原生孔隙。

新生代受欧亚板块碰撞以及帕米尔构造带大幅度向北旋转的影响, 西昆仑造山带发生强烈的隆升 (程晓敢等, 2011)。甫沙地区表现为强烈的冲断和快速沉降, 当 $R_0 > 0.7\%$ 、地层温度大于 120 °C

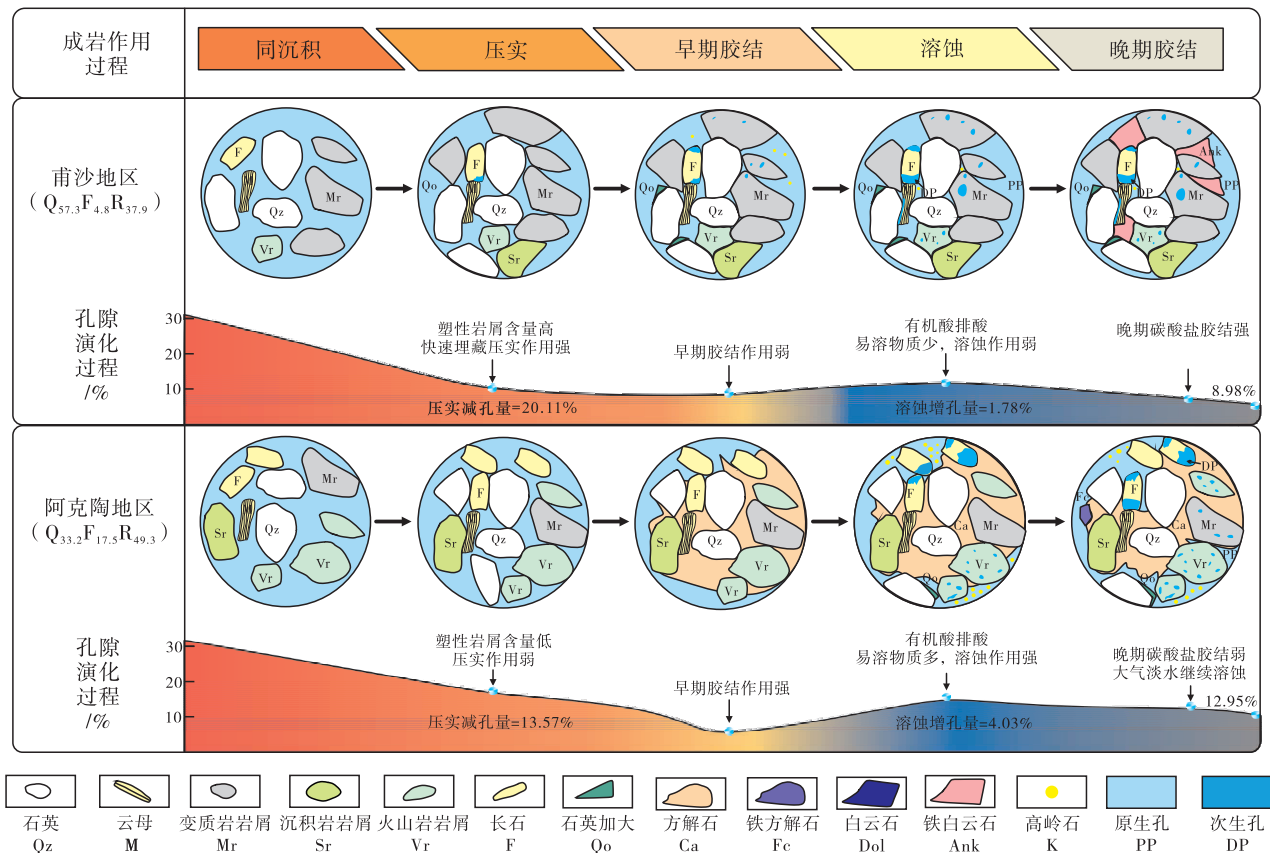


图 10 塔西南山前下侏罗统砂岩储集层孔隙演化模式图

Fig. 10 Pore evolution model diagram of the Lower Jurassic sandstone reservoirs in piedmont southwestern Tarim Basin

时，有机酸的浓度开始降低，成岩环境由酸性逐渐转换为碱性；受晚期构造活动影响，镜下见裂缝充填铁白云石；综合早期和后期碳酸盐胶结物、少量黏土和硅质胶结物，甫沙地区总胶结减孔量为 4.31%。然而，阿克陶地区表现为短暂的深埋后抬升至地表；该区后期发育极少量铁方解石胶结物，综合早期方解石、后期硅质和黏土矿物，阿克陶地区总胶结减孔量为 8.36%。

综合分析不同地区下侏罗统砂岩储集层埋藏史、热演化史和成岩演化史，甫沙和阿克陶地区计算所得现今孔隙度分别为 8.98% 和 12.95%。综上所述，认为塔西南山前不同母岩性质的储集层特征存在差异，母岩性质决定砂岩储集层的原始组分和岩石类型，同时影响成岩作用路径与产物的类型，最终导致储集空间和孔隙演化存在差异。

6 结论

1) 塔西南山前下侏罗统砂岩储集层母岩类

型、源区构造背景和岩石学特征差异明显。甫沙地区砂岩储集层的母岩主要为元古界变质岩、含少量早古生代岩浆岩和二叠系沉积岩，源区构造背景属于混合造山带；储集层岩石类型主要为岩屑砂岩，表现为低长石、高变质岩岩屑和分选中等的特点。阿克陶地区下侏罗统砂岩储集层的母岩主要为晚古生代—三叠纪喷出岩，源区构造背景属于火山弧造山带和混合造山带；储集层岩石类型主要为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩，呈现出高长石、高喷出岩岩屑和分选差—中等的特征。

2) 受母岩性质影响，不同地区成岩作用特征差异明显。塑性岩屑类型及含量影响了压实作用的强弱。胶结物类型主要以碳酸盐矿物为主，其中甫沙地区多为铁白云石胶结物，而阿克陶地区主要为方解石胶结物；母岩性质影响不同地区钙离子的来源。易溶组分的类型及含量决定溶蚀作用的强弱。甫沙地区现今成岩作用阶段处于中成岩 A₂ 期，阿克陶最高则处于中成岩 B 期，之后抬升至地表处于表生阶段。

3) 母岩性质导致储集空间类型和孔隙演化过程存在差异。甫沙地区储集空间类型主要为剩余原生孔隙, 压实和胶结减孔量大, 溶蚀增孔量小; 阿克陶地区储集空间类型主要为粒内与粒间溶孔, 溶蚀增孔量和胶结减孔量大, 压实减孔量小, 导致最终的储集层质量较好。

参考文献 (References)

- 陈春峰, 钟楷, 朱伟林, 徐东浩, 王军, 张伯成. 2017. 东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响. 石油与天然气地质, 38(5): 963–972. [Chen C F, Zhong K, Zhu W L, Xu D H, Wang J, Zhang B C. 2017. Provenance of sediments and its effects on reservoir physical properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. Oil & Gas Geology, 38(5): 963–972]
- 程晓敢, 雷刚林, 陈汉林, 杜治利, 廖林, 罗俊成, 师骏. 2011. 西昆仑山前甫沙—克里阳地区新生代变形特征及油气控制作用. 石油学报, 32(1): 83–89. [Cheng X G, Lei G L, Chen H L, Du Z L, Liao L, Luo J C, Shi J. 2011. Cenozoic structural deformation of the Fusha-Keliyang area in the piedmont of the western Kunlun Mountains and its control on hydrocarbon accumulation. Acta Petrologica Sinica, 32(1): 83–89]
- 杜晓峰, 庞小军, 王清斌, 宋章强, 马正武. 2017. 石白坳凸起东段围区沙一二段古物源恢复及其对储层的控制. 地球科学, 42(11): 1897–1909. [Du X F, Pang X J, Wang Q B, Song Z Q, Ma Z W. 2017. Restoration of the paleo-provenance of the Es₁₂ in the eastern of Shijiutuo uplift and its control on reservoir. Earth Science, 42(11): 1897–1909]
- 郭帅, 陈莹, 曾清波, 杨海长, 韩银学, 纪沫, 沈怀磊, 郭佳, 赵钊. 2017. 珠江口盆地白云凹陷北坡恩平组上段三角洲物源演化及储集意义. 天然气地球科学, 28(10): 1527–1536. [Guo S, Chen Y, Zeng Q B, Yang H C, Han Y X, Ji M, Shen H L, Guo J, Zhao Z. 2017. Provenance evolution of delta and the effects on reservoir quality in sandstones of the upper Enping Formation in the north of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. Natural Gas Geoscience, 28(10): 1527–1536]
- 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. 古地理学报, 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]
- 李超, 陈国辉, 何智远, 王平, 薛飞, 施一凡. 2023. 中国西部新生代陆内前陆盆地迁移过程及其构造指示意义. 地球科学进展, 38(7): 729–744. [Li C, Chen G H, He Z Y, Wang P, Xue F, Shi Y F. 2023. Migration processes of the Cenozoic intracontinental foreland basins in western China and their tectonics implications. Advances in Earth Science, 38(7): 729–744]
- 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 徐长贵, 杜晓峰, 李慧勇. 2017. 沙垒田凸起古近纪源-汇系统中有利储层评价与预测. 地球科学, 42(11): 1994–2009. [Li S L, Zhu X M, Liu Q H, Xu C G, Du X F, Li H Y. 2017. Evaluation and prediction of favorable reservoirs in source-to-sink systems of the Palaeogene, Shaleitian uplift. Earth Science, 42(11): 1994–2009]
- 廖晓, 王震亮, 范昌育, 杨有星, 解巧明, 赵子龙. 2018. 西昆仑山前甫沙—克里阳地区中新代构造事件的裂变径迹证据及其地质意义. 中南大学学报(自然科学版), 49(3): 642–654. [Liao X, Wang Z L, Fan C Y, Yang Y X, Xie Q M, Zhao Z L. 2018. Fission track evidence for Meso-Cenozoic tectonic event of Fusha; Keliyang area in piedmont of the western Kunlun Mountains and its geological significance. Journal of Central South University (Science and Technology), 49(3): 642–654]
- 刘成军. 2015. 西昆仑造山带(西段)及周缘早古生代—早中生代物质组成与构造演化. 长安大学博士学位论文. [Liu C J. 2015. Composition and tectonic evolution of west Kunlun orogenic belt and its periphery in the Early Paleozoic-early Mesozoic. Doctoral dissertation of Chang'an University]
- 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]
- 卢炳雄, 文华国, 淡水, 陈洪, 朱永才, 于景维. 2018. 准噶尔盆地阜康凹陷阜东斜坡齐古组储层控制因素及有利区预测. 石油与天然气地质, 39(3): 549–557. [Lu B X, Wen H G, Dan Y, Chen H, Zhu Y C, Yu J W. 2018. Favorable accumulation region prediction and controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Qigu Formation in the Fudong slope, Fukang Sag, Junggar Basin. Oil & Gas Geology, 39(3): 549–557]
- 罗静兰, 刘新社, 付晓燕, 李杪, 康锐, 贾亚妮. 2014. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响: 以鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 天然气储层为例. 地球科学, 39(5): 537–545. [Luo J L, Liu X S, Fu X Y, Li M, Kang R, Jia Y N. 2014. Impact of petrologic components and their diagenetic evolution on tight sandstone reservoir quality and gas yield: a case study from He₈ gas-bearing reservoir of upper Paleozoic in northern Ordos Basin. Earth Science, 39(5): 537–545]
- 马东旭, 许勇, 吕剑文, 吉鸿杰, 妥成荣, 郝乐伟, 苏龙, 王琪. 2016. 鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组物源特征及其与储层关系. 天然气地球科学, 27(7): 1215–1224. [Ma D X, Xu Y, Lü J W, Ji H J, Tuo C R, Hao L W, Su L, Wang Q. 2016. Relationship between provenance and formation of Lower Shihezi Formation in Linxing area, Ordos Basin, China. Natural Gas Geoscience, 27(7): 1215–1224]
- 陶再礼, 尹继元, 袁超, 肖文交, 陈文, 陈岳龙, 王雅美, 杨帆. 2022. 西昆仑造山带晚奥陶世侵入岩的岩石成因: 对原特提斯洋俯冲过程的制约. 岩石学报, 38(11): 3321–3340. [Tao Z L, Yin J Y, Yuan C, Xiao W J, Chen W, Chen Y L, Wang Y M, Yang F. 2022. Petrogenesis of Late Ordovician intrusive rocks in the West Kunlun orogenic belt: constraints on the subduction process of the Proto-Tethys Ocean. Acta Petrologica Sinica, 38(11): 3321–3340]

- 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—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]
- 肖文摇,吕修祥,白忠凯,王雅芳,涂金. 2016. 塔西南坳陷侏罗系泥页岩特征及页岩气潜力分析. 煤炭学报, 41(S2): 491-501. [Xiao W Y, Lü X X, Bai Z K, Wang Y F, Tu J. 2016. Characteristics of Jurassic shales and potential of shale gas in Southwest Depression of Tarim Basin. Journal of China Coal Society, 41(S2): 491-501]
- 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藏藏的影响. 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 & Experiment, 41(2): 165-175]
- 尤丽,李才,张迎朝,甘军,刘景环. 2012. 珠江口盆地文昌A凹陷珠海组储层碳酸盐胶结物分布规律及成因机制. 石油与天然气地质, 33(6): 883-889, 899. [You L, Li C, Zhang Y Z, Gan J, Liu J H. 2012. Distribution and genetic mechanism of carbonate cements in the Zhuhai Formation reservoirs in Wenchang: A sag, Pear River Mouth Basin. Oil & Gas Geology, 33(6): 883-889, 899]
- 蔚远江,胡素云,何登发. 2020. 准噶尔盆地西北缘二叠系—下侏罗统碎屑岩骨架组分及其物源与构造背景演化示踪. 地质学报, 94(5): 1347-1366. [Yu Y J, Hu S Y, He D F. 2020. Skeleton components of Permian-Lower Jurassic clastic rocks in NW margin of Junggar basin: tracing to provenance and tectonic settings evolution. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1347-1366]
- 曾庆鲁,张荣虎,张亮,刘春,陈才,夏九峰. 2020. 塔里木盆地西南坳陷下白垩统沉积相与储集层差异演化特征. 天然气地球科学, 31(10): 1375-1388. [Zeng Q L, Zhang R H, Zhang L, Liu C, Chen C, Xia J F. 2020. Sedimentary facies and reservoir evolution divergence of Early Cretaceous sandstones in Southwest Depression of Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 31(10): 1375-1388]
- 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]
- 朱世发,崔航,陈嘉豪,骆高俊,王文禹,杨祎,施翌. 2021. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征:以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例. 沉积学报, 39(1): 126-139. [Zhu S F, Cui H, Chen J H, Luo G J, Wang W Y, Yang Y, Shi Y. 2021. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow water delta: case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 126-139]
- Gao D, Cheng R H, Shen Y J, Wang L L, Hu X Q. 2018. Weathered and volcanic provenance: sedimentary system and its influence on reservoir quality in the east of the eastern depression, the north Yellow Sea Basin. Journal of Earth Science, 29: 353-368.
- Gao Y, Wang Z Z, Yi S W, She Y Q, Lin S G, Li M P, Yang Z, Chen S S. 2020. Diagenetic characteristics and quantitative evolution of porosity in tight gas sandstone reservoirs: a case study from the middle and Lower Permian in the northwestern Ordos Basin, China. Interpretation, 8: T195-T215.
- Rembe 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, (1): 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.
- Tiercelin J J, Potdevin J L, Morley C K, Talbot M R, Bellon H, Rio A, Le Gall B, Vétel W. 2004. Hydrocarbon potential of the Meso-Cenozoic Turkana Depression, northern Kenya. I. Reservoirs: depositional environments, diagenetic characteristics, and source rock-reservoir relationships. Marine and Petroleum Geology, 21: 41-62.
- Zhu G Y, Liu W, Wu G H, Ma B S, Nance R D, Wang Z C, Xiao Y, Chen Z Y. 2021. Geochemistry and U-Pb-Hf detrital zircon geochronology of metamorphic rocks in terranes of the West Kunlun Orogen: protracted subduction in the northernmost Proto-Tethys Ocean. Precambrian Research, 363: 106344.
- Zhu S F, Zhu X M, Chen J H, Yang Z, Jia Y, Cui H. 2018. Diagenetic differences in tight sandstone reservoirs in two delta fronts: an example from the Chang 4 and 5 members of the Yanchang Formation in the Longdong Area, Ordos Basin, China. Arabian Journal of Geosciences, 11: 715.
- Zhu S F, Zhu X M, Jia Y, Cui H, Wang W Y. 2020. Diagenetic alteration, pore-throat network, and reservoir quality of tight gas sandstone reservoirs: a case study of the upper Paleozoic sequence in the northern Tianhuan depression in the Ordos Basin, China. AAPG Bulletin, 104(11): 2297-2324.

(责任编辑 李新坡)