

深层-超深层碎屑岩优质储层成因机理

——以准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系为例

王继远^{1,2}, 王 斌^{1,2}, 胡宗全³, 商丰凯⁴, 刘德志⁴, 李振明^{1,2}, 邱 岐^{1,2}, 宋振响^{1,2}, 胡志啟⁵

[1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257001; 5. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074]

摘要: 为了揭示准噶尔盆地腹部深层-超深层碎屑岩优质储层成因机理, 利用盆地腹部地区最新钻井资料及岩心样品, 通过铸体薄片、扫描电镜、能谱和包裹体分析以及XRD等测试方法, 对二叠系上乌尔禾组和三叠系百口泉组与克拉玛依组储层成因进行研究。结果表明: 成岩演化差异控制了原生孔隙和次生溶蚀孔隙的发育。克拉玛依组经历了压实、绿泥石包壳式胶结、长石/火山岩岩屑溶蚀、硅质胶结、自生伊利石沉淀以及晚期方解石胶结, 其中绿泥石包壳是原生孔隙保存的最主要成岩矿物; 上乌尔禾组经历了压实、绿泥石充填式胶结、浊沸石胶结、浊沸石/长石/火山岩岩屑溶蚀、硅质胶结、自生伊利石沉淀以及晚期方解石胶结, 其中早期浊沸石胶结以及浊沸石、长石和火山岩岩屑酸性溶蚀是次生孔隙发育的关键成岩作用。受浅水辫状河三角洲前缘水下分流河道高能相带强水动力淘洗, 储层原始孔隙结构优越, 与早成岩期的绿泥石包壳及强超压共同控制原生孔隙的保存。中-基性火山岩岩屑水化蚀变成因的高硬度浊沸石早期胶结, 抵抗了快速深埋阶段的压实减孔。多期生烃酸性流体伴随超压传递促进硅铝酸盐矿物溶蚀增孔。低地温背景下, 上乌尔禾组-百口泉组仍处于中成岩A-B期, 减缓了成岩演化进程, 有效孔隙发育的下限深度增加。

关键词: 成因机理; 优质储层; 深层-超深层; 上乌尔禾组; 百口泉组; 克拉玛依组; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Genetic mechanisms of high-quality deep to ultra-deep clastic reservoirs: A case study of the Permian-Triassic strata in the hinterland of the Junggar Basin

WANG Jiyuan^{1,2}, WANG Bin^{1,2}, HU Zongquan³, SHANG Fengkai⁴, LIU Dezhi⁴, LI Zhenming^{1,2}, QIU Qi^{1,2}, SONG Zhenxiang^{1,2}, HU Zhiqi⁵

[1. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China; 5. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: This study aims to reveal the genetic mechanisms underlying high-quality deep to ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin. Using the latest drilling data and core samples from the hinterland, as well as data from casting thin section observations, scanning electron microscopy (SEM), spectral analysis, inclusion analysis, and X-ray diffraction (XRD) analysis, we investigate the origins of reservoirs in the Permian Upper Urho Formation and the Triassic Baikouquan and Karamay formations. The results indicate that differential diagenetic evolution governs the development of primary pores and secondary dissolution pores. The Karamay Formation underwent compaction, chlorite coating cementation, dissolution of feldspar/volcanic detritus, siliceous cementation, authigenic illite precipitation, and the late-stage calcite cementation sequentially, during which chlorite coatings emerged as the most significant diagenetic

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-11-10。

第一作者简介: 王继远(1990—), 男, 博士研究生、工程师, 油气储层表征与评价。E-mail: wangjiyuan1992_syky@sinopec.com。

通信作者简介: 王斌(1981—), 男, 博士研究生、高级工程师, 沉积储层综合研究。E-mail: wangbin_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部基础前瞻性项目(2023JCQZ0037, P22132)。

mineral for the preservation of primary pores. In contrast, the Upper Urho Formation experienced compaction, chlorite filling cementation, laumontite cementation, dissolution of laumontite/feldspar/volcanic detritus, siliceous cementation, authigenic illite precipitation, and the late-stage calcite cementation in sequence. The early-stage laumontite cementation and acid dissolution of laumontite/feldspar/volcanic detritus, among others, play a critical role in the formation of secondary pores. In the subaqueous distributary channels at the front of the shallow braided river delta, the strong hydrodynamic elutriation in high-energy facies zones results in superior primary pore structures in these reservoirs. This, combined with early-stage chlorite coatings and significant overpressure, collectively contributes to the preservation of primary pores. The early-stage cementation of high-hardness laumontite formed by the hydrothermal alteration of intermediate-mafic volcanic detritus resists the compaction and porosity reduction in the rapid deep burial stage. The acidic fluids from multi-stage hydrocarbon generation and overpressure transfer jointly accelerate the dissolution of aluminosilicate minerals and porosity enhancement. Under the background of low geotemperature, the Upper Urho-Baikouquan formations remain in middle diagenetic stages A and B, which has slowed down the diagenetic evolution and increased the lower depth limit for effective porosity development.

Key words: genetic mechanism, high-quality reservoir, deep to ultra-deep strata, Upper Urho Formation, Baikouquan Formation, Karamay Formation, Junggar Basin

引用格式:王继远,王斌,胡宗全,等. 深层-超深层碎屑岩优质储层成因机理——以准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 151-166. DOI: 10. 11743/ogg20250111.

WANG Jiyuan, WANG Bin, HU Zongquan, et al. Genetic mechanisms of high-quality deep to ultra-deep clastic reservoirs: A case study of the Permian-Triassic strata in the hinterland of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 151-166. DOI: 10. 11743/ogg20250111.

近年来,全球范围内深层-超深层碎屑岩油气勘探接连取得重要突破,成为当前油气勘探的热点领域^[1-3]。其中,美国墨西哥湾的Jack 2井在7 620 m深度的碎屑岩中测试获得日产油量818 t;中国西部的塔里木盆地库车拗陷博孜9井在7 700 m深度的白垩系巴什基奇克组砂岩中获得日产气量 $41.82 \times 10^4 \text{ m}^3$ 及日产油量 115.15 m^3 的高产油气流;准噶尔盆地腹部征10井在6 800 m深度的三叠系克拉玛依组测试获得日产气量 $7\,530.00 \text{ m}^3$ 和日产油量 78.18 m^3 ,以及二叠系上乌尔禾组压裂后获得日产气量 $3.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和日产油量 13.10 m^3 的油气突破。上述勘探成果证实深层-超深层碎屑岩油气资源潜力巨大,已成为增储上产的重要阵地^[4-7]。然而,随着埋藏深度的增大,碎屑岩储层趋于致密,同时,其地层温度和压力均有别于浅部地层,成岩演化过程复杂,原生孔隙能否有效保存及次生孔隙能否大量发育是决定深层优质碎屑岩储层发育与否的关键因素^[8-11]。前人研究普遍认为,以方解石胶结物和长石碎屑为主的酸性不稳定矿物的溶蚀,膏盐层的应力卸载,以及构造挤压或快速埋藏等形成的超压是深层碎屑岩优质储层发育的主要因素^[12-14]。但对于弱构造改造区的富火山岩岩屑类深层碎屑岩储层,受成岩体系封闭影响其方解石往往以胶结为主,难以大规模溶蚀,同时又缺少大量刚性颗粒的支撑及上覆塑性地层的应力卸载等诸多有利

因素,其孔隙的保存和发育机理值得深入探讨。因此,本文以准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系深层-超深层碎屑岩储层为例,在前人研究基础上,利用最新钻井、测井和取心资料,综合岩石薄片镜下分析、扫描电镜、阴极发光、包裹体测温和孔渗测试等方法,开展了储层发育特征及主控因素分析,旨在揭示准噶尔盆地腹部地区二叠系-三叠系碎屑岩优质储层发育机理,为深层-超深层碎屑岩领域油气勘探提供参考借鉴。

1 研究区概况

准噶尔盆地位于新疆北部,构造位置上介于塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块之间,面积约 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。自晚古生代形成以来,受海西、印支、燕山和喜马拉雅等多期构造运动影响,准噶尔盆地先后经历了5期盆地演化,分别是:①石炭纪洋盆消亡阶段,形成残余洋盆和沟弧海原型盆地;②二叠纪以来整体隆升的陆相湖盆发育阶段,其中,早二叠世为碰撞后的伸展裂陷期,形成箕状断陷盆地;③中二叠世后进入断-拗转换期,形成弱挤压差异沉降分隔拗陷型盆地;④晚二叠世—古近纪为弱挤压整体拗陷阶段,盆地沉积范围逐渐扩大,分隔逐渐统一;⑤古近纪以来,受喜马拉雅运动影响,北天山快速隆升,

进入前陆盆地阶段,南缘形成一系列带状褶皱、断裂,而腹部整体以抬升为主^[15-17]。

准噶尔盆地腹部地区包括盆1井西凹陷、沙湾凹陷、东道海子凹陷和阜康凹陷及莫索湾凸起、莫北凸起和白家海凸起7个二级构造单元(图1a),地层发育完整,在古生界复合基底之上发育了上石炭统一第四系较为齐全的巨厚沉积盖层^[18-19]。其中,二叠系自下而上分别发育佳木河组(P_{1j}),风城组(P_{1f}),夏子街组(P_{2x}),下乌尔禾组(P_{2w})和上乌尔禾组(P_{3w})5套地层,三叠系自下而上发育百口泉组(T_1b),克拉玛依组(T_2k)和白碱滩组(T_3b)3套地层(图1b)。前人研究证实,二叠系风城组和下乌尔禾组为盆内主力烃源岩;储层方面,盆内发育石炭系火山岩,二叠系以风城组为代表的碱湖相云质泥页岩,二叠系上乌尔禾组和三叠系百口泉组砂砾岩及侏罗系-白垩系的砂岩储层,整体呈常规-非常规油气有序共生的格局^[20-12]。当前,准噶尔盆地二叠系-三叠系碎屑岩油气主力产区集中在玛湖凹陷周缘斜坡区及腹部凸起区,产层主要为夏子街组、上乌尔禾组和百口泉组^[23-25]。近期,在腹部深凹区东道海子凹陷成6井的下乌尔禾组和上乌尔禾组以及沙湾凹陷征10井的上乌尔

禾组和克拉玛依组相继获得油气突破,使得腹部二叠系-三叠系成为深层-超深层碎屑岩领域勘探的重点。

2 储层基本特征

2.1 岩石学特征

选取准噶尔腹部地区4口新钻井(沙15井、征10井、成6井和董17井)上乌尔禾组、百口泉组和克拉玛依组3个层位的75块样品,通过岩石薄片显微镜下分析,明确砂岩储层的岩石类型和成分特征。结果显示各层位岩石类型类似,以岩屑砂岩为主,含少量长石岩屑砂岩(图2),砂岩中岩屑含量极高,平均可达60%以上,岩屑成分复杂,以安山岩、粗面岩和玄武岩等中-基性火山岩岩屑为主,含少量沉积岩和变质岩岩屑(图3a—i)。整体上长石和石英含量低,二者之和普遍低于30%。胶结物成分主要包括方解石、浊沸石、硅质及绿泥石、伊利石和高岭石等黏土矿物(图3a,d,h,i)。其中,硅质胶结和方解石胶结在各层位均有不同程度发育;绿泥石在克拉玛依组多以包壳形式存在,在

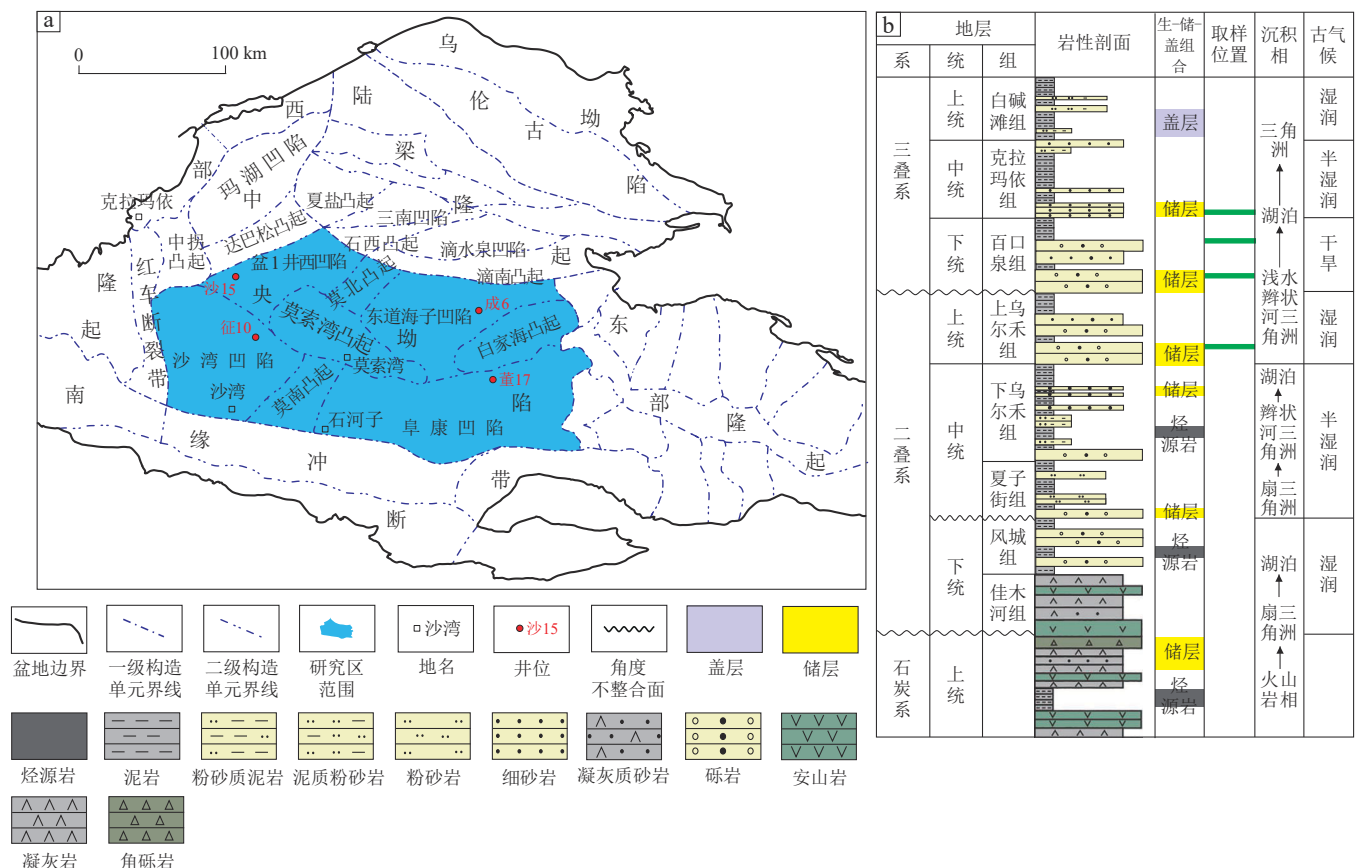


图1 准噶尔盆地腹部构造位置(a)及地层综合柱状图(b)(据文献[26]修改)

Fig. 1 The tectonic location map (a) and composite stratigraphic column of the hinterland of the Junggar Basin (modified after reference [26])

百口泉组 and 上乌尔禾组则以孔隙充填形式存在; 浊沸石胶结主要发育在百口泉组 and 上乌尔禾组, 克拉玛依组未见发育。结构成熟度上, 各层位分选中等, 磨圆呈次棱角-次圆状, 颗粒间以线-面接触为主(图3a, g), 反映整体压实作用较强。

2.2 物性及储集空间特征

56块样品常温常压下气测孔渗实验结果显示, 研究区二叠系-三叠系碎屑岩整体为低孔、低渗与特低孔、特低渗致密储层(表1)。其中, 三叠系克拉玛依组孔隙度介于1.78%~13.18%, 平均值7.88%, 渗透率介于 $(0.001 \sim 8.890) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值 $1.790 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 百口泉组孔隙度介于3.34%~9.20%, 平均值6.62%, 渗透率介于 $(0.016 \sim 1.230) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值 $0.450 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 二叠系上乌尔禾组孔隙度介于3.69%~10.50%, 平均值5.88%, 渗透率介于 $(0.006 \sim 7.200) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值 $0.560 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

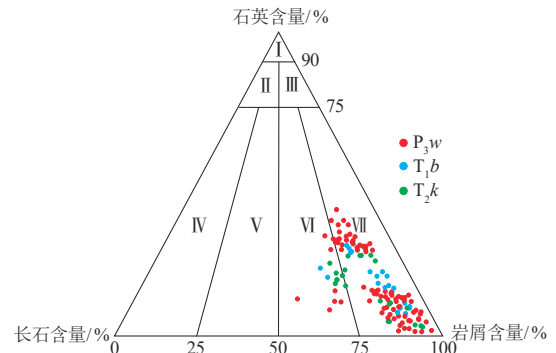


图2 准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系砂岩岩石类型划分
Fig. 2 Classification of the Permian-Triassic sandstones in the hinterland of the Junggar Basin

I. 石英砂岩; II. 长石石英砂岩; III. 岩屑石英砂岩; VI. 长石砂岩;
V. 岩屑长石砂岩; VI. 长石岩屑砂岩; VII. 岩屑砂岩

克拉玛依组物性最好, 百口泉组次之, 上乌尔禾组相对较低, 但受裂缝影响, 上乌尔禾组个别样品渗透率较高(图4)。

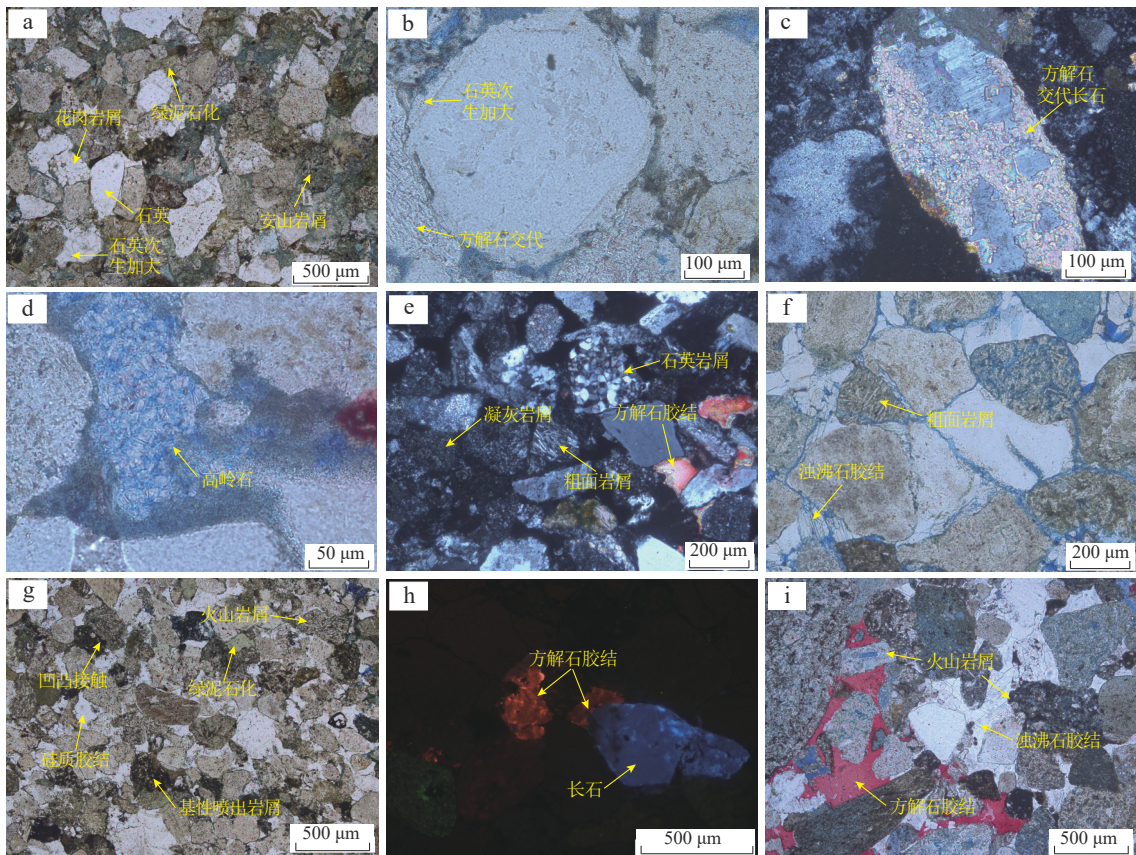


图3 准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系砂岩铸体薄片显微镜下特征照片

Fig. 3 Microscopic characteristics of the Permian-Triassic sandstones from the hinterland of the Junggar Basin under thin section observation
a. 董17井, 埋深6 116.0 m, T_3b , 火山岩岩屑大量发育, 绿泥石化普遍, 局部见石英次生加大, 单偏光; b. 成6井, 埋深5 452.0 m, T_2k , 浑圆状石英, 发育次生加大边, 见方解石交代岩屑, 单偏光; c. 成6井, 埋深5 452.0 m, T_2k , 方解石交代长石, 正交光; d. 成6井, 埋深5 452.0 m, T_2k , 高岭石充填, 单偏光; e. 征10井, 埋深6 580.0 m, T_2k , 粗面岩岩屑和变质石英岩岩屑局部粒间方解石胶结, 正交光; f. 征10井, 埋深7 059.5 m, T_1b , 粗面岩等中性火山岩岩屑发育, 粒间浊沸石胶结, 单偏光; g. 董17井, 埋深6 585.4 m, T_1b , 中-基性火山岩岩屑发育, 局部硅质胶结, 弱胶结处火山岩岩屑颗粒之间呈凹凸接触, 单偏光; h. 董17井, 埋深7 149.0 m, P_3w , 粒间方解石胶结, 阴极发光; i. 沙15井, 埋深6 196.0 m, P_3w , 火山岩岩屑发育, 颗粒间方解石和浊沸石胶结, 单偏光, 茜素红染色

表1 准噶尔盆地腹部重点井分组储层物性统计

Table 1 Statistics of reservoir properties of various formations in key wells in the hinterland of the Junggar Basin

物性	沙15井			征10井			董17井		成6井		
参数	克拉玛依组	百口泉组	上乌尔禾组	克拉玛依组	百口泉组	上乌尔禾组	百口泉组	上乌尔禾组	克拉玛依组	百口泉组	上乌尔禾组
孔隙度/%	4.76~11.05	3.34~8.08	3.69~6.67	1.78~13.18	4.48~8.66	4.71~8.39	9.2~9.2	4.00~10.50	1.93~8.56	3.29~8.00	2.77~7.16
度/%	7.65(10)	6.15(6)	5.15(8)	8.09(11)	6.72(6)	6.22(9)	9.2(1)	6.42(5)	6.23(5)	6.09(6)	4.79(22)
渗透率/ (10^{-3} μm^2)	0.10~3.26	0.04~1.02	0.07~0.26	0.001~8.890	0.14~1.23	0.12~1.12	0.01~0.010	0.006~7.200	0.10~1.22	0.10~0.92	0.1~0.6
	0.97(10)	0.39(6)	0.13(8)	1.79(11)	0.63(6)	0.46(9)	0.01(1)	1.47(5)	0.75(5)	0.49(6)	0.18(22)

注:表中数据格式为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品个数)}}$, 其中成6井列数值为测井解释数据, 其他井数值为实测数据。

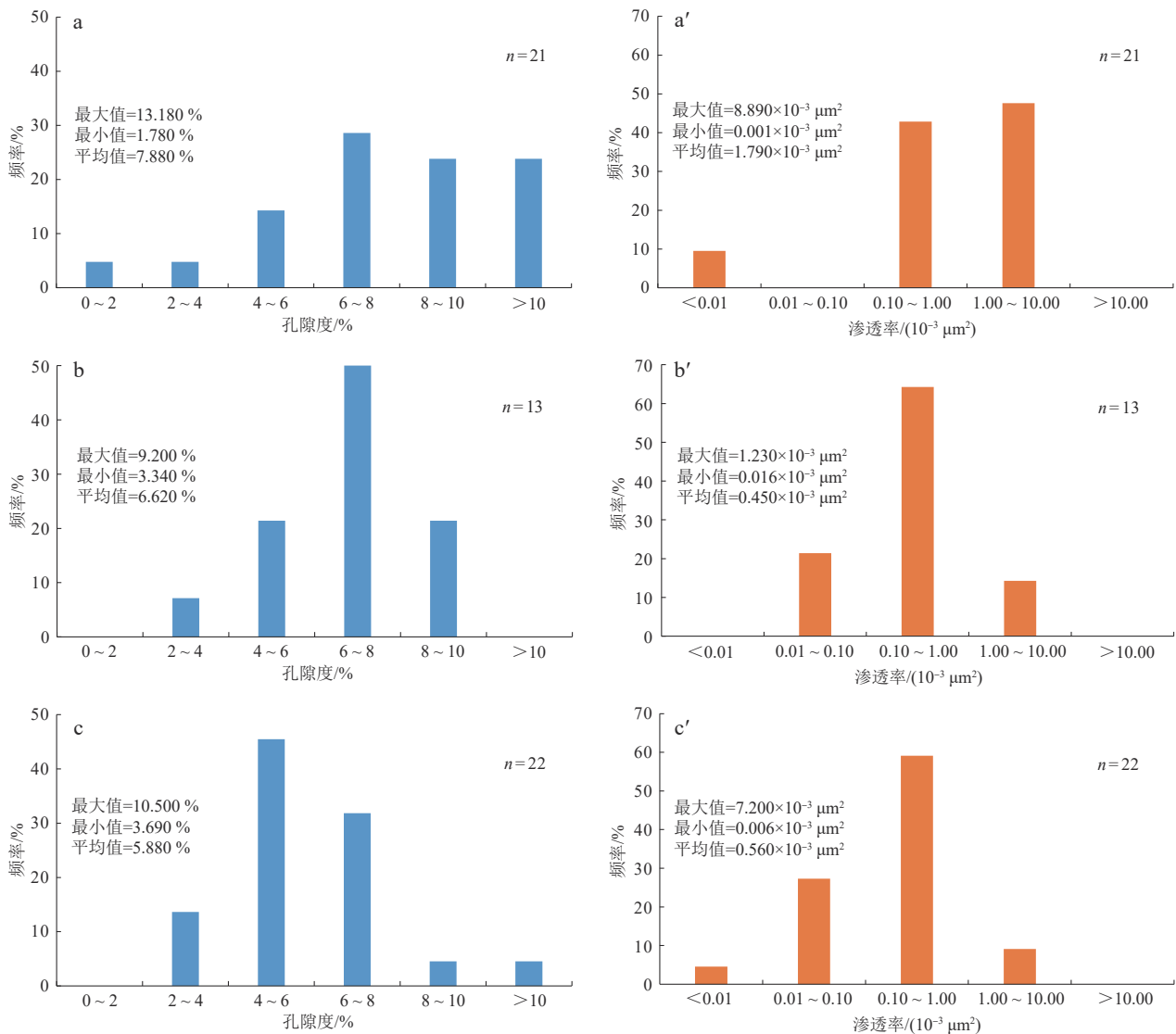


图4 准噶尔盆地腹部上乌尔禾组-克拉玛依组储层物性频率分布直方图

Fig. 4 Histograms showing the distributions of the physical properties of reservoirs in the Upper Urho-Karamay formations in the hinterland of the Junggar Basin

a, a'. 三叠系克拉玛依组(T₂k); b, b'. 三叠系百口泉组(T₁b); c, c'. 二叠系上乌尔禾组(P₃w)

a—c. 孔隙度; a'—c'. 渗透率

铸体薄片观察和扫描电镜分析结果显示,上乌尔禾组-克拉玛依组碎屑岩储集空间类型多样,原生孔

隙、次生孔隙和微裂缝均有不同程度发育。其中,上乌尔禾组以次生孔隙为主,占93.55%,原生孔隙仅占

6.45%;百口泉组的次生孔隙占52.76%,原生孔隙占47.24%;克拉玛依组以原生孔隙为主,占67.95%,次生孔隙占32.05%(图5)。

原生孔隙是指岩石颗粒原始孔隙空间经过压实和胶结等一系列成岩作用后的残余部分,研究区原生孔隙主要为残余原生粒间孔,发育相对较局限,主要见于征10井克拉玛依组和董17井百口泉组。原生粒间孔大小不一、边界平直,呈不规则多边形(图6a—c),发育于颗粒分选、磨圆较好的层段,颗粒间表现为弱压实和弱胶结特征。除孔隙形态特征外,绿泥石包壳的发育是研究区原生孔隙判别的重要标志,其以包壳形式覆盖在碎屑颗粒表面,相邻颗粒间的绿泥石包壳相互接触搭建成相对规则的孔隙格架,其间不发育(或少量发育)自生矿物;此外,原生孔隙发育层段孔隙度和渗透率相关性较好,常表现为相对高孔高渗的特征。以征10井克拉玛依组为例,样品原生粒间孔靠近颗粒边缘发育绿泥石包壳,孔隙间见少量自生石英颗粒(图6a, b);扫描电镜下,董17井百口泉组样品可见粒间孔被绿泥石和自生石英半充填,现今孔隙为充填残余部分(图6c)。

次生孔隙是在成岩演化过程中受化学成岩作用影响形成的孔隙空间,其形态特征多样,边界弯曲,常呈不规则的港湾状,且多表现为相对高孔低渗的特征,是研究区最主要的储集空间,包括溶蚀孔和黏土矿物晶间孔2种类型。溶蚀孔是岩石中易溶组分受流体作用溶蚀产生的次生孔隙空间,在各层位均有不同程度的发育,浊沸石和富长石斑晶的火山岩岩屑是其发育的重要物质基础。根据孔隙发育的空间位置分为粒间溶蚀孔和粒内容蚀孔2种类型,粒间溶蚀孔主要为浊沸石胶结物的溶蚀孔,研究区不同层位浊沸石的溶蚀强度各异,常见大量溶蚀残留,且多与裂缝伴生(图6d,

j);粒内容蚀孔包括长石溶蚀孔和火山岩岩屑溶蚀孔2种类型,其中,火山岩岩屑内部的长石斑晶等不稳定组分优先溶蚀(图6e, h)。晶间孔是在成岩作用过程中自生矿物结晶形成的孔隙空间,常发育于结晶程度高,晶体形态相对完好的矿物集合体或晶粒间,从本次样品中主要识别出高岭石晶间孔、绿泥石晶间孔和伊利石晶间孔(图6g—i),其中高岭石与长石溶蚀作用伴生,是长石溶蚀的产物(图6g),黏土矿物对储层渗透率起负作用,但由于其具有较强的吸附性,可吸附大量气体,成为天然气的有效储集空间。

微裂缝是另一种重要的储集空间类型,主要包括围绕颗粒边缘分布的粒缘缝、脆性矿物破裂缝和穿切颗粒分布的网状缝(图6k, l)。其中,粒缘缝可能与成岩过程中矿物的脱水收缩有关,而破裂缝和网状裂缝主要受构造作用或超压等因素影响。微裂缝不仅是重要的储集空间,同时也能有效改善储层渗透性。

3 优质储层发育机理

综上所述,准噶尔盆地腹部二叠系—三叠系埋深普遍超过6 000 m的背景下仍发育优质储层,突破了传统有效储层埋深下限(4 500 m);笔者曾针对上述2类储层的成岩作用与孔隙演化过程开展细致研究^[18]。本文从沉积、成岩和温压条件入手,系统开展优质储层发育机理分析,揭示了研究区深层—超深层碎屑岩浅水辫状河三角洲前缘水下分流河道和滩坝微相控制下,绿泥石包壳和浊沸石等硅铝酸盐的选择性溶蚀与超压—低地温复合控储机制。

3.1 沉积相奠定优质储层发育的物质基础

沉积相奠定了优质储层发育的物质基础。准噶尔盆地腹部二叠系—三叠系发育浅水辫状河三角洲相—湖相沉积,水体浅,湖平面动荡频繁^[26],砂体主要发育于辫状河三角洲平原、前缘水下分流河道、河口坝和滨浅湖滩坝4种沉积微相中;浅水辫状河三角洲平原相砂体粒度粗、结构和成分成熟度低,杂基含量高,不具备优质储层发育的基础;前缘水下分流河道和河口坝发育厚层中—细砂岩,水动力强,加之水体频繁动荡,砂体淘洗充分,成分和结构成熟度均高,储集性能优越,其中水下分流河道砂原生粒间孔和次生溶蚀孔均有不同程度的发育,孔隙度最高可达13.18%,是研究区优质储层最为发育的相带;河口坝砂体孔隙类型以次生溶蚀孔为主,孔隙度6.00%;此外,滨浅湖的滩坝微相发育夹层型砂岩,也可作为优质储层,孔隙度最高

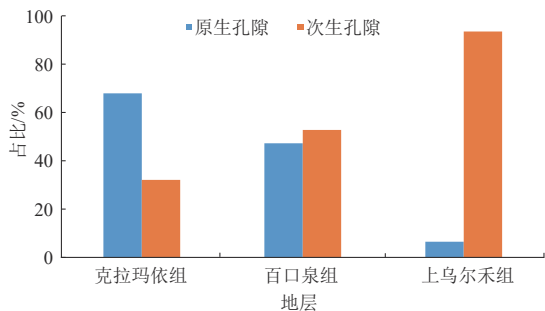


图5 准噶尔盆地腹部二叠系—三叠系上乌尔禾组—克拉玛依组不同类型孔隙占比统计柱状图

Fig. 5 Histogram showing the proportions of various pore types in the Permian Upper Urho Formation and the Triassic Baikouquan and Karamay formations in the hinterland of the Junggar Basin

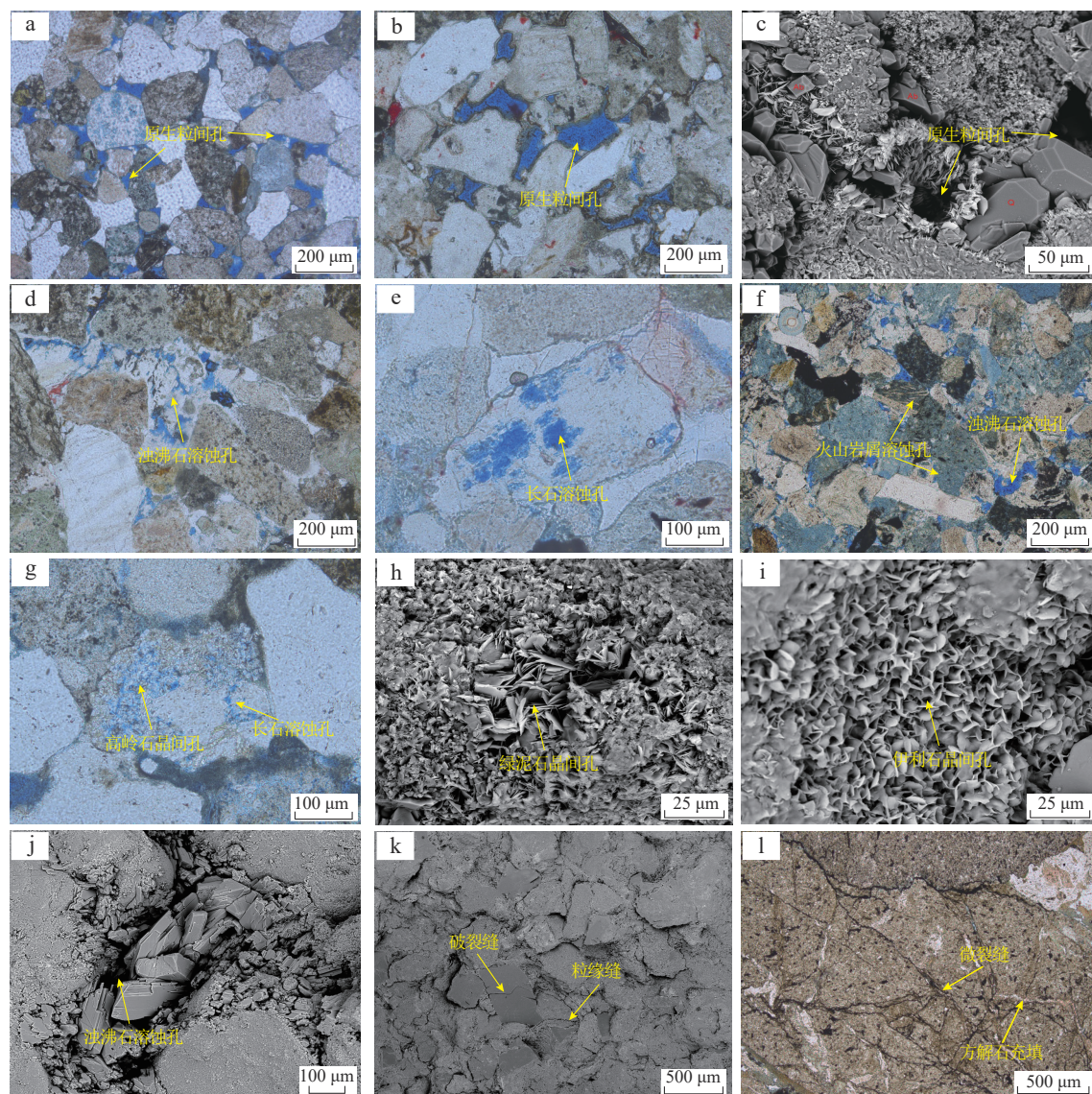


图6 准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系碎屑岩储集空间镜下特征照片

Fig. 6 Microscopic characteristics of the storage spaces in the Permian-Triassic clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin

- a. 征10井,埋深6 710.0 m, T_2k ,原生粒间孔,蓝色铸体,单偏光;b. 征10井,埋深6 772.5 m, T_2k ,原生粒间孔,孔内见少量石英锥晶,蓝色铸体,单偏光;c. 董17井,埋深6 585.4 m, T_2b ,原生粒间孔,孔内局部充填石英、绿泥石和钠长石微晶,扫描电镜;d. 征10井,埋深6 961.0 m, T_1b ,浊沸石溶蚀孔,孔内见沥青质残留,蓝色铸体,单偏光;e. 沙15井,埋深6 294.0 m, P_3w ,长石溶蚀孔,蓝色铸体,单偏光;f. 董17井,埋深6 788.5 m, P_3w ,火山岩屑和浊沸石溶蚀孔,蓝色铸体,单偏光;g. 成6井,埋深5 452.0 m,高岭石晶间孔与长石溶蚀伴生, T_2k ,蓝色铸体,单偏光;h. 董17井,埋深6 595.0 m, T_1b ,绿泥石晶间孔,扫描电镜;i. 董16井,埋深6 893.0 m, P_3w ,伊利石晶间孔,扫描电镜;j. 董17井,埋深6 734.0 m, T_1b ,浊沸石晶间孔和溶蚀孔,扫描电镜;k. 董17井,埋深7 149.0 m, P_3w ,粒缘缝和破裂缝,扫描电镜;l. 董17井,埋深7 137.4 m, P_3w ,网状缝,裂缝内部方解石和泥质、铁质充填,蓝色铸体,单偏光

可达10.30%(图7)。综上,辫状河三角洲前缘水下分流河道储层最优,滩坝次之,河口坝相对较差(图8)。

3.2 绿泥石包壳是原生孔隙保存的重要条件

准噶尔盆地自形成以来整体保持持续沉降趋势,岩石中塑性岩屑含量极高,抗压能力较弱,强烈的压实作用导致研究区储层致密化严重,损失了大量原生孔隙,是储层致密化的最主要因素之一。但三叠系克拉玛依组局部层段原生孔隙保存较好,表明存在其他

因素减缓或抑制了压实的减孔效应。

通过对克拉玛依组原生孔隙发育层段的分析发现,绿泥石包壳的形成对原生孔隙的保存具有重要意义。它通常以近等厚的薄膜状围绕在石英和岩屑颗粒的表面,而在喉道变窄及颗粒紧密接触处厚度减小甚至停止发育,表明绿泥石包壳是沉积后成岩期的自生矿物。就其分布位置而言,辫状河三角洲前缘水下分流河道等高能相带最为发育。在绿泥石包壳发育层段,胶结作用较弱,孔隙连通性强,原生孔隙大量保存(图9a),其原因在

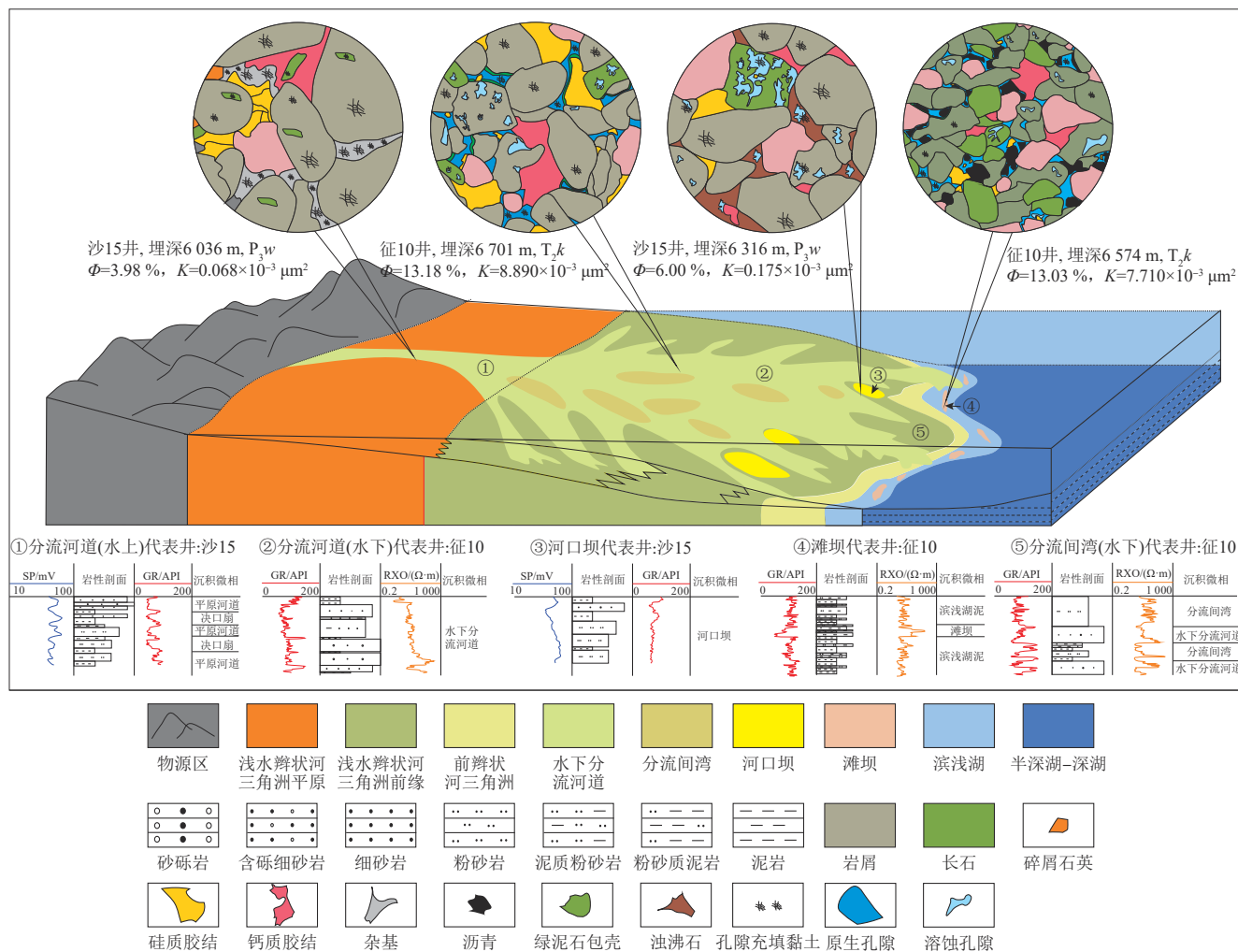


图7 准噶尔盆地腹部二叠系-三叠系不同沉积微相储层发育模式

Fig. 7 Schematic diagram showing developmental characteristics of the Permian-Triassic reservoirs across various sedimentary microfacies in the hinterland of the Junggar Basin

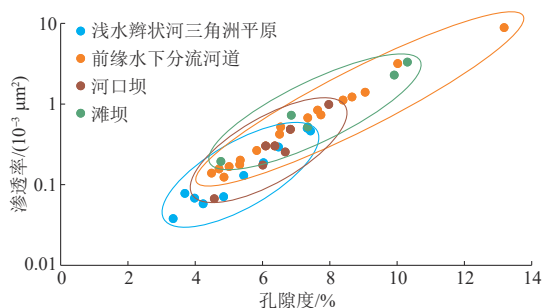


图8 不同沉积微相孔隙度-渗透率关系散点图

Fig. 8 Scatter diagram showing the porosity vs. permeability of various sedimentary microfacies in the hinterland of the Junggar Basin

于附着在碎屑颗粒表面的绿泥石一方面可以减少颗粒间的接触,降低强烈压实作用导致的压溶,另一方面抑制石英次生加大,降低硅质胶结的减孔作用(图9c)。通过对克拉玛依组砂岩黏土矿物中绿泥石占比与孔隙度的相关性分析发现,当绿泥石整体含量低于4%时,

绿泥石含量与储层物性呈正相关(图9b),证实了绿泥石包壳对研究区储层发育的建设性作用。

能谱分析结果显示,研究区绿泥石镁/铁含量比值 $[Fe/(Fe+Mg)]$ 较高,表现为富Fe、相对贫Mg的特征,表明绿泥石的沉淀可能受火山物质影响较大,这与研究区岩石成分中高比例的中-基性火山岩岩屑具有较好的对应关系,成岩期火山岩岩屑的水解可释放大量 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} ,在碱性环境中为自生绿泥石的沉淀提供了物质来源。

3.3 浊沸石发育是优质储层形成的关键

上乌尔禾组和百口泉组发育大量浊沸石,作为富钙的硅铝酸盐矿物,浊沸石在研究区主要以胶结物的形式存在,它与方解石之间存在组分竞争,二者含量呈此消彼长的互补关系。就物理性质而言,浊沸石的莫氏硬度为6,而方解石的莫氏硬度仅为3(表2),因此浊

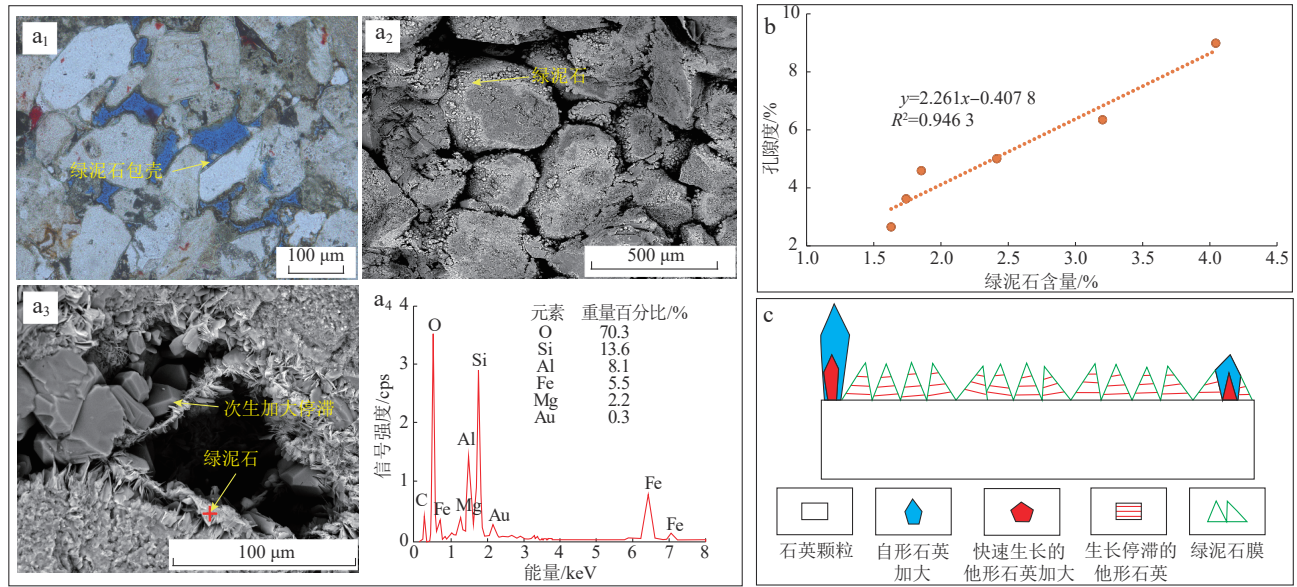


图9 准噶尔盆地绿泥石包壳典型特征及其与孔隙发育关系

Fig. 9 Typical characteristics of chlorite coatings and their association with porosity development in the hinterland of the Junggar Basin

a₁. 征10井,埋深6 796 m, T₂k,绿泥石包壳覆盖在石英颗粒表面,颗粒间未见明显胶结,单偏光蓝色铸体显微照片;a₂. 征10井,埋深6 796 m, T₂k,绿泥石包壳覆盖在颗粒表面,颗粒间原生粒间孔保存好,扫描电镜照片;a₃. 董17井,埋深6 364 m, T₂k,绿泥石包壳抑制石英次生加大典型现象,扫描电镜照片;a₄. 绿泥石包壳能谱图,点位见a₃;b. 包壳段绿泥石含量与孔隙度相关性;c. 绿泥石包壳抑制石英次生加大模式(据文献[27]修改)

沸石抗压实能力更强,对孔隙的保存意义更大。

除具有高抗压强度外,浊沸石形成过程因矿物转化而产生一定规模的晶间孔,对研究区储层发育也具有重要意义。沉积岩中自生浊沸石主要发现于富含火山岩岩屑和钙长石的陆相或海相陆源碎屑岩中,国内外学者针对其成因开展了大量研究,目前尚未形成统一认识,但普遍认为火山物质的水化蚀变^[28-29]和斜长石的钠长石化^[30-31]是其最主要成因。

准噶尔盆地腹部地区二叠系-三叠系碎屑岩储层斜长石含量较低,不具备转化形成浊沸石的物质基础。而高含量的火山岩岩屑在埋藏过程中随着温度的升高极易发生水化蚀变,为浊沸石的沉淀提供了物质来源。火山物质水化蚀变形成浊沸石是一个复杂的反应过程,反应早期以不稳定的斜发沸石、片沸石和方沸石为主,浊沸石是反应序列中的最终产物,同时伴随着钠长石的沉淀。为了验证在研究区是否真实存在火山物质转化形成浊沸石这一反应过程,本次选取董17井石炭系火山岩开展扫描电镜和能谱分析,扫描电镜下检测到火山物质、方沸石、浊沸石和钠长石的共生现象

(图10a)。接触关系上,方沸石位于靠近火山灰一侧(图10d),向外依次为钠长石和浊沸石(图10b,c),其形成时间应早于浊沸石,现今只能见到少量方沸石残留,而浊沸石大量发育,因此可以判定浊沸石主要来源于火山物质的水化蚀变,钠长石为伴生矿物。

火山物质多级转化最终形成稳定浊沸石对研究区碎屑岩储层发育具有重要意义。早期不稳定沸石含多个结晶水,转化为浊沸石过程中释放晶间水产生晶间孔,同时不稳定沸石转化为浊沸石的反应伴随高密度长石和石英的沉淀,反应前、后的密度差也会产生大量孔隙。

3.4 酸性溶蚀是次生孔隙发育的主要途径

研究区二叠系-三叠系经历了早侏罗世末期一晚侏罗世中期、早白垩世中期-古近纪初期以及古近纪中期3期油气充注^[32]。生烃相关的酸性流体溶蚀是次生孔隙发育的主要因素。溶蚀物质上,以长石、火山岩岩屑和浊沸石为主,方解石未见明显溶蚀(图11a-c),这种差异溶蚀作用导致储层发育的非均质性极强。关于碎屑岩储层中长石与方解石的差异溶蚀,目前普遍

表2 准噶尔盆地腹部典型矿物物理性质

Table 2 Physical properties of typical minerals in the hinterland of the Junggar Basin

物理性质	浊沸石	片沸石	方沸石	斜发沸石	方解石	斜长石	钾长石	石英
密度/(g/cm ³)	2.32	2.20	2.00~2.20	2.16	2.71	2.60	2.54~2.57	2.65
莫氏硬度	6.00	3.50~4.00	5.50	4.00~5.00	3.00	6.00~6.50	6.00	7.00

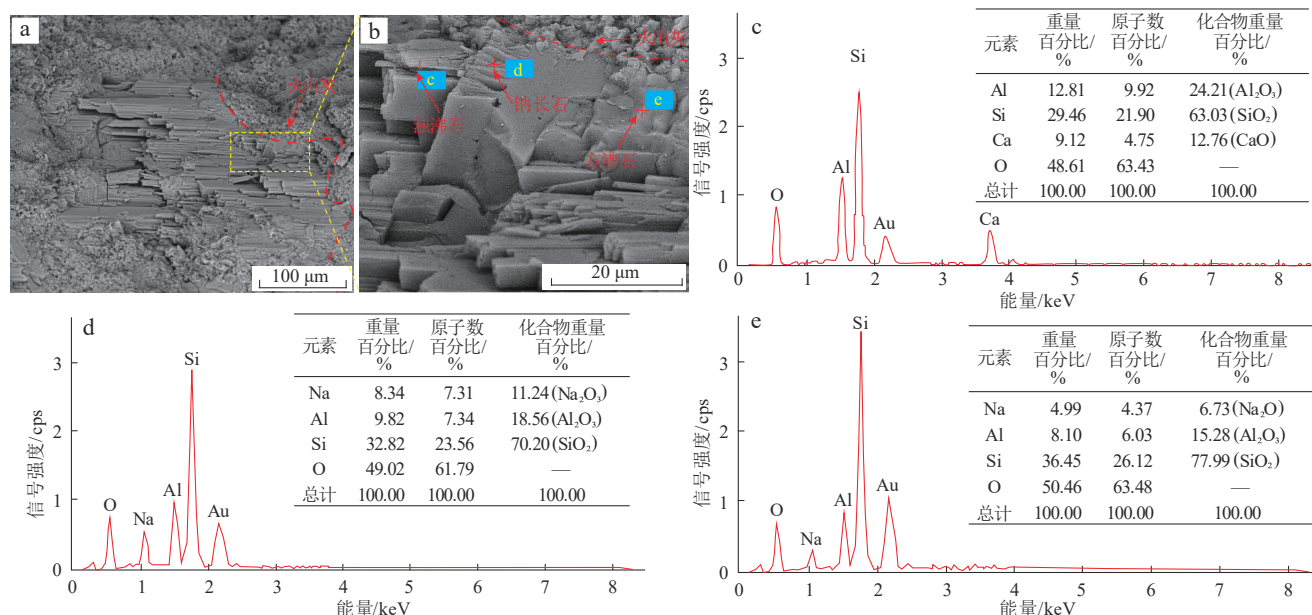
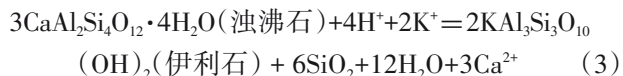
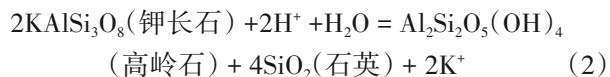
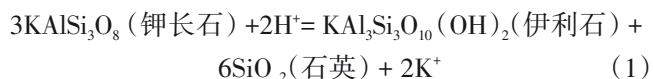


图10 准噶尔盆地腹部董17井石炭系火山物质水化蚀变成因浊沸石共生矿物组合特征

Fig. 10 Paragenetic mineral assemblage of laumontite from hydrothermal alteration of the Carboniferous volcanic materials, albite and analcite in well Dong 17 in the hinterland of the Junggar Basin

a. 董17井,埋深7 412.85 m,石炭系,火山岩中浊沸石、钠长石和方沸石共生,扫描电镜照片;b. a图局部放大,扫描电镜照片;c. 浊沸石能谱图;d. 钠长石能谱图;e. 方沸石能谱图

认为是封闭成岩体系内化学平衡的结果。室内溶蚀模拟实验结果显示,在开放-半开放体系下,方解石的溶蚀速率远高于长石,而封闭体系下长石溶蚀反应的化学平衡常数大于方解石和白云石,且随着温度的升高二者平衡常数的差异逐渐增大,而长石的溶蚀消耗CO₂,导致封闭体系内HCO₃⁻过饱和,抑制碳酸盐矿物的溶解,甚至导致其沉淀^[33]。此外,也有学者认为深层碎屑岩储层中碳酸盐矿物的差异溶蚀是受CO₂分压影响,高CO₂分压作用抑制碳酸盐矿物的溶蚀反应,甚至逆向进行,形成以碳酸盐矿物为主的沉淀,而浊沸石作为一种含水的架状硅铝酸盐矿物,其成分和晶体结构与斜长石类似,推测其在酸性条件下的易溶程度与长石相近,深层封闭条件下均优先于方解石溶蚀;火山岩岩屑的溶蚀则主要是其内部的长石斑晶。长石和浊沸石的溶蚀产物主要是伊利石和自生石英,反应过程见公式(1)—公式(3):



扫描电镜和偏光显微镜下见多处溶蚀孔隙与油迹和沥青等伴生,同时浊沸石溶蚀孔见多处荧光显示(图11d—f),表明溶蚀流体主要来源于有机质热演

化生烃。

3.5 超压和低地温是优质储层发育的保障

超压和低地温是研究区优质储层发育的重要条件。本次基于声波、电阻率和泥岩密度3条测井曲线恢复了单井压力的纵向分布特征并分析了超压与孔隙发育的关系。以征10井为例,二叠系—三叠系发育异常高压,压力系数普遍大于1.6,最高可达2.0(图12)。超压成因以超压传递为主,仅沙15井存在欠压实成因(图13)。

超压与孔隙度纵向分布特征显示,强超压与异常高孔段具有良好对应关系。征10井压力系数高值区对应原生孔隙发育段,压力系数2.0处孔隙度高达13.18%;董17井压力系数1.71处也对应孔隙度11.70%的高值点(图14a,b)。对比而言,征10井克拉玛依组埋深比董17井大134 m,但受强超压控制,前者压实强度较低,原生孔隙保存相对较好。

超压成因上,研究区除沙15井外超压成因均以超压传递为主。随着烃源岩生烃压力传导至储层中,必然伴随生烃流体的注入,其中有机酸等酸性流体的注入为溶蚀孔隙的发育提供了条件,而油气的充注在一定程度上可抵抗压实,同时改变成岩流体属性,终止油气充注之前的自生矿物沉淀,减缓胶结作用。此外,超压具有一定的造缝能力,在储层内部产生超压微裂缝,

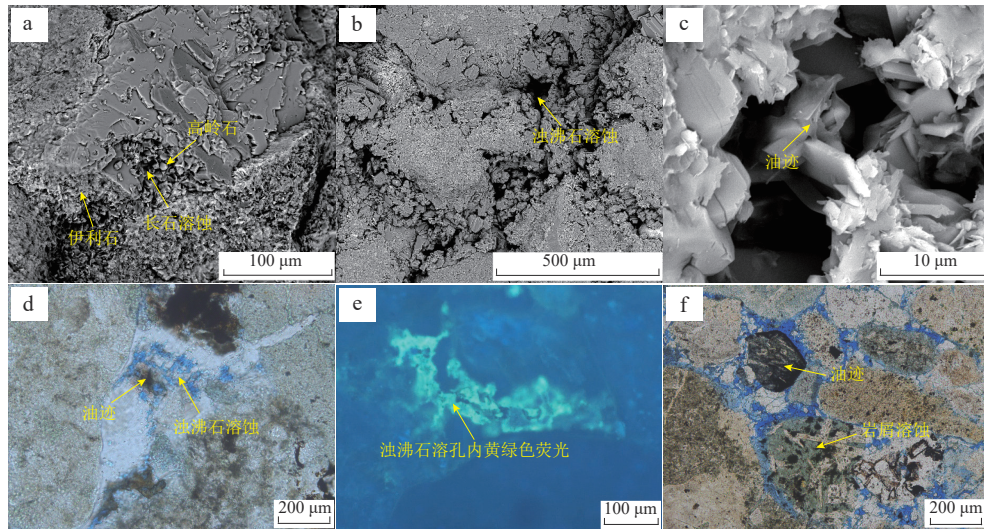


图11 准噶尔盆地腹部典型矿物溶蚀特征显微照片

Fig. 11 Dissolution characteristics of typical minerals in the hinterland of the Junggar Basin

a. 董17井,埋深6 595 m, T_1b , 长石溶蚀, 伊利石和高岭石充填长石溶蚀孔, 扫描电镜; b. 董17井,埋深6 734 m, T_1b , 浊沸石溶蚀, 扫描电镜; c. 董17井,埋深6 734 m, T_1b , 粒间孔中见油迹包裹绿泥石, 扫描电镜; d. 征10井,埋深6 961 m, T_1b , 浊沸石溶蚀孔内见油迹残留, 单偏光, 铸体薄片; e. 征10井,埋深6 961 m, T_1b , 浊沸石溶蚀孔内荧光显示, 荧光, 铸体薄片; f. 董17井,埋深6 734 m, T_1b , 岩屑溶蚀, 溶蚀孔内见油迹, 单偏光, 铸体薄片

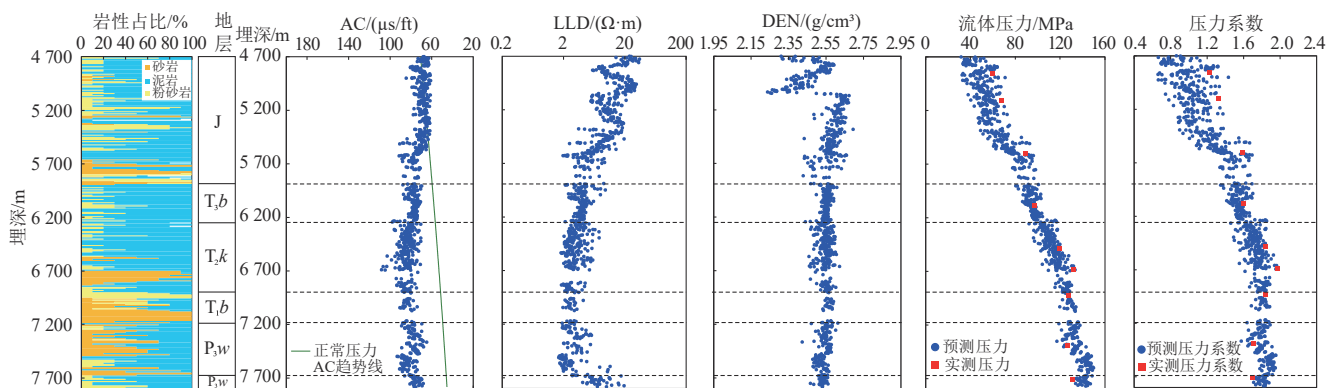


图12 准噶尔盆地腹部征10井泥岩超压测井响应特征

Fig. 12 Logging responses to the overpressure in well Zheng 10 in the hinterland of the Junggar Basin

可有效改善储层的渗透性能,对深层碎屑岩储层的发育也具有积极意义。

地温对研究区储层的发育 also 具有重要意义,准噶尔盆地从早二叠世起大地热流持续降低,现今地温梯度仅为 $2.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,大地热流值为 $35.60\text{ mW}/\text{m}^2$,属于典型的“冷盆”^[34],一般而言,高温体系下水岩反应进程快,热压实效应强,不利于孔隙的保存。准噶尔盆地的低地温有效减缓了成岩强度,在埋深7 000 m左右仍处于中成岩A-B期(图13b,c),极大地拓宽了有效孔隙保存深度下限,为深层-超深层碎屑岩储层的发育奠定了基础。

4 优质储层发育与孔隙演化模式

笔者此前针对研究区二叠系-三叠系储层孔隙演

化开展了详细研究^[18],基于反演回剥法,恢复了上乌尔禾组-克拉玛依组孔隙定量演化过程(表3)。本次结合前期研究成果,综合埋藏、沉积、成岩和孔隙演化过程,建立了研究区克拉玛依组-上乌尔禾组优质储层的成岩-成储综合模式。

以征10井为例,克拉玛依组-上乌尔禾组沉积时期,受西部克拉玛依物源和乌尔禾物源影响,发育辫状河三角洲平原、前缘和滩坝等多套砂体(图15a),沉积时期地形平缓、坡度小,砂体延伸远,碎屑颗粒经历了长距离搬运,分选磨圆好,原始孔隙度高。但受母岩物质组成差异的影响,上乌尔禾组原始孔隙度(40.36%)高于克拉玛依组(36.42%)。沉积之后,二者经历了不同的成岩演化路径,最终导致孔隙类型和发育程度的差异。

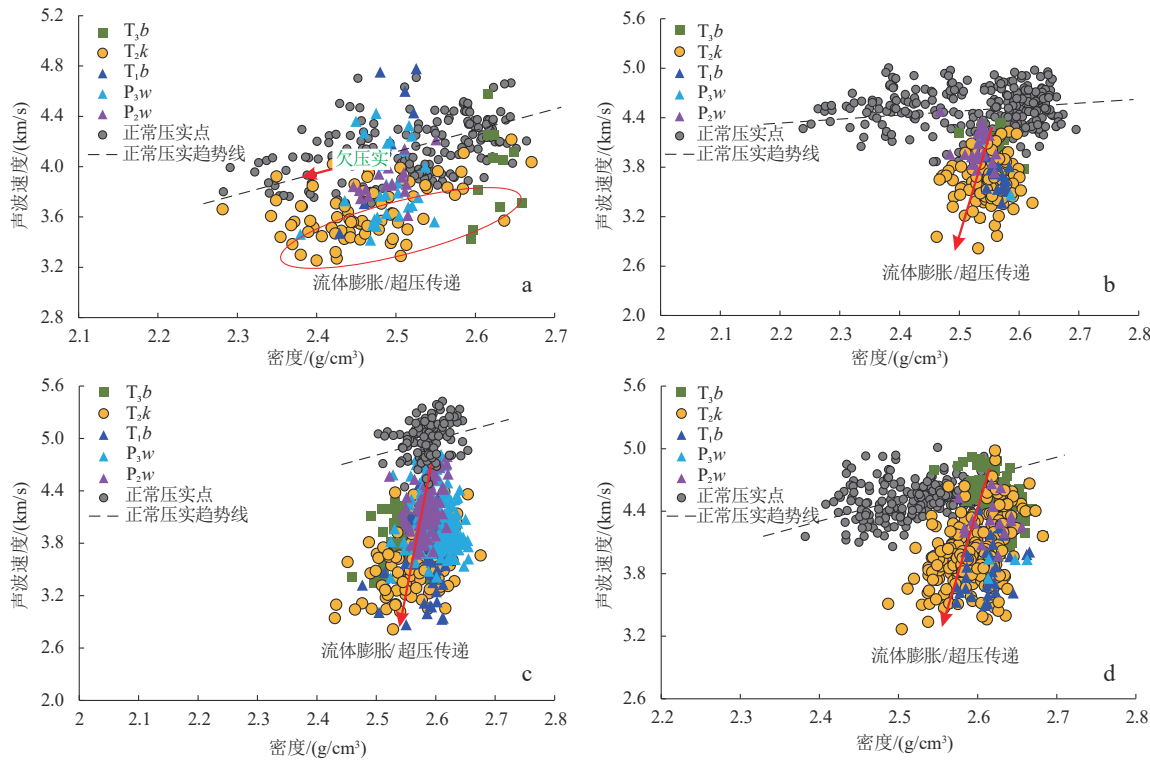


图 13 准噶尔盆地腹部典型井二叠系-三叠系超压成因分析

Fig. 13 Genetic analysis of the Permian-Triassic overpressure in typical wells in the hinterland of the Junggar Basin
a. 沙15井; b. 征10井; c. 成6井; d. 董17井

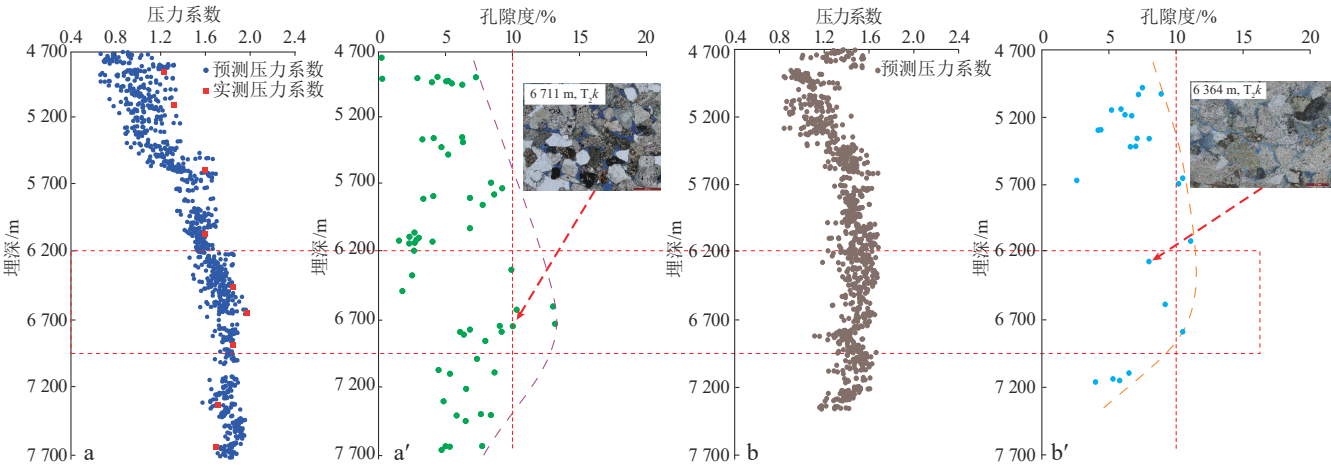


图 14 准噶尔盆地腹部压力系数(a,b)与孔隙度(a',b')纵向分布对比

Fig. 14 Correlation of the longitudinal distributions of pressure coefficients (a,b) and porosities (a',b') in the hinterland of the Junggar Basin
a, a'. 征10井; b, b'. 董17井

表 3 准噶尔盆地腹部征10井不同层位孔隙演化参数恢复结果

Table 3 Restored pore evolution parameters of different formations in well Zheng 10 in the hinterland of the Junggar Basin								
地层	分选系数	原始 孔隙度/%	胶结面孔率/%	胶结 孔隙度/%	溶蚀面孔率/%	溶蚀孔隙度/%	现今 孔隙度/%	压实减孔率/ %
克拉玛依组	1.48	36.42	0.72	2.88	0.33	1.40	13.18	21.08
百口泉组	1.22	39.68	2.03	7.43	1.70	6.32	7.95	26.60
上乌尔禾组	1.18	40.36	3.12	11.00	1.09	4.21	4.85	26.43

克拉玛依组主要经历了早成岩A期至中成岩B期4个演化阶段,成岩序列为:压实—绿泥石包壳式胶结—长石/岩屑溶蚀—硅质胶结—自生伊利石沉淀—晚期方解石胶结。每个阶段成岩作用与孔隙定量演化过程如下。

自初始沉积至早成岩A期,以压实和早期绿泥石

沉淀为主,其中压实作用是孔隙度降低最主要的成岩作用类型,这一阶段克拉玛依组持续沉降,上覆压实强度大,压实减孔率可达21.08%(图15a,b),绿泥石以黏土包壳的形式附着在碎屑颗粒表面,降低了储层内部流体与碎屑的接触面积,极大地抑制了石英次生加大,对原生孔隙的保存至关重要。早成岩B期,随着火

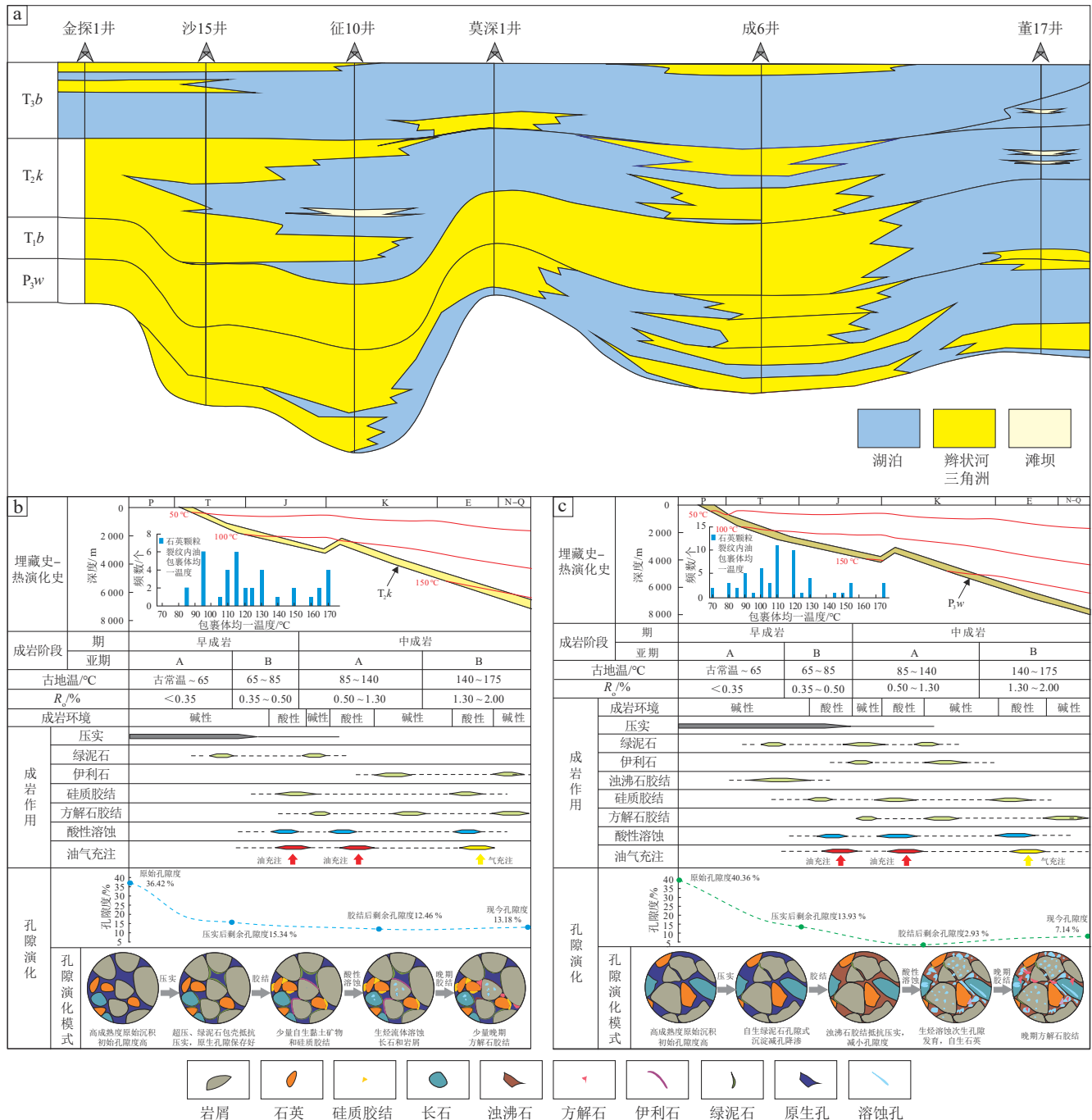


图15 准噶尔盆地腹部克拉玛依组-上乌尔禾组优质储层成岩成储综合模式

Fig. 15 Comprehensive diagrams showing the diagenesis and accumulation of high-quality reservoirs in the Karamay and Upper Urho formations in the hinterland of the Junggar Basin

a. 过沙15井—征10井—成6井—董17井连井沉积相剖面;b. 征10井克拉玛依组成岩作用与孔隙演化模式;c. 征10井上乌尔禾组成岩作用与孔隙演化模式

山岩岩屑的水化蚀变,自生石英和早期方解石开始沉淀,形成胶结物,使孔隙度进一步降低,但从镜下统计看二者胶结规模不大,减孔效应有限;随后烃源岩到达早期成熟,源岩内生烃导致的超压传导至储层,造成储层内部超压,同时早期的油气充注也在一定程度上抑制了压实作用;此外,伴随压力传导而来的酸性流体溶蚀长石和火山岩岩屑,增加了一部分孔隙,这一过程中长石等物质的溶蚀伴随石英的沉淀;随着酸性流体的消耗,成岩环境逐渐向碱性过渡,在富钾的成岩环境下,自生伊利石沉淀进一步降低孔隙度。中成岩A期,有机质达到生烃高峰,酸性流体在此时进入储层,溶蚀长石和火山岩岩屑,孔隙度提高。中成岩B期,成岩环境为碱性,受超压影响,成岩体系相对封闭,体系内以晚期方解石胶结和伊利石沉淀为主;经历多期胶结后,克拉玛依组孔隙度降低至12.46%,两期溶蚀增孔0.72%,现今孔隙度13.18%。从成岩作用类型、强度和增/保孔效应来看,克拉玛依组储层经历中等压实、弱胶结以及中-弱溶蚀,受超压、绿泥石包壳控制,原生孔隙保存较好。

上乌尔禾组同样经历了早成岩A期至中成岩B期4个演化阶段,成岩序列为:压实—绿泥石充填式胶结—浊沸石胶结—浊沸石/长石/岩屑溶蚀—自生伊利石沉淀—晚期方解石胶结。各阶段成岩作用与孔隙演化过程如下。

初始沉积至早成岩A期,以压实作用、绿泥石和早期方解石胶结为主,其中绿泥石以粒间充填物的形式存在,主要起减孔作用,压实减孔率可达26.43%。中成岩B期,火山物质在水化蚀变的作用下沉淀大量浊沸石并以粒间胶结物的形式存在,硬度高且具较好的抗压性。烃源岩早期成熟生烃,有机酸性流体进入储层溶蚀长石、火山岩岩屑和浊沸石,伴随自生石英等沉淀,随着生烃酸性流体消耗成岩环境变为碱性,开始沉淀方解石和自生伊利石。中成岩A期,烃源岩达到高成熟生烃,有机酸性流体大量进入储层,致浊沸石、长石和岩屑大规模溶蚀。中成岩B期,以碱性环境下的晚期方解石胶结和绿泥石的伊利石化为主(图15c)。受多期胶结作用影响,本组孔隙度降低至2.93%,而两期溶蚀作用增孔4.21%,现今孔隙度为7.14%。整体上,上乌尔禾组储层经历中-强压实、强胶结和中-强溶蚀,受浊沸石、长石和火山岩岩屑等酸性不稳定矿物的溶蚀控制,孔隙类型以次生溶蚀孔为主。

5 结论

1) 成岩演化差异控制了不同类型储层的分布,克

拉玛依组经历压实、绿泥石包壳式胶结、长石/火山岩岩屑溶蚀、硅质胶结、自生伊利石沉淀以及晚期方解石胶结,其中绿泥石包壳是原生孔隙保存的最主要成岩作用;上乌尔禾组经历压实、绿泥石充填式胶结、浊沸石胶结、浊沸石/长石/火山岩岩屑溶蚀、硅质胶结、自生伊利石沉淀以及晚期方解石胶结,其中早期浊沸石胶结和浊沸石、长石及火山岩岩屑的酸性溶蚀是次生孔隙发育的关键成岩作用。

2) 克拉玛依组原生孔隙型优质储层主要发育于浅水辫状河三角洲前缘水下分流河道微相,其水体能量强,岩石淘洗充分,杂基含量低,储层原始孔隙结构好;成岩早期中-基性火山岩岩屑的水解促进了绿泥石包壳的发育,抑制石英次生加大,并与强超压共同作用有效抵抗压实,利于原生孔隙的保存。

3) 次生孔隙型优质储层分布于上乌尔禾组和百口泉组,其发育受早期浊沸石胶结,长石、浊沸石和火山岩岩屑的酸性溶蚀和超压-低地温联合控制。中-基性火山岩岩屑水化蚀变沉淀高硬度浊沸石,抵抗快速深埋阶段的压实减孔;多期生烃酸性流体伴随超压传递促进硅铝酸盐矿物的溶蚀增孔;低地温背景使研究区深层-超深层仍处于中成岩A-B期,减缓了成岩演化进程,拓宽了有效孔隙发育的深度下限。

参 考 文 献

- [1] 白国平,曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 19-25.
BAI Guoping, CAO Binfeng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 19-25.
- [2] 李阳,薛兆杰,程喆,等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [3] 罗晓容,张立宽,雷裕红,等. 储层结构非均质性及其在深层油气成藏中的意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 28-36.
LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, LEI Yuhong, et al. Structural heterogeneity of reservoirs and its implication on hydrocarbon accumulation in deep zones[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 28-36.
- [4] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 四川盆地深层-超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 1-14.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 1-14.

- [5] 赖锦, 肖露, 赵鑫, 等. 深层-超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 612-625.
- LAI Jin, XIAO Lu, ZHAO Xin, et al. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: A case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(4): 612-625.
- [6] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [7] 孙靖, 郭旭光, 尤新才, 等. 准噶尔盆地深层-超深层致密碎屑岩储层特征及有效储层成因[J]. 地质学报, 2022, 96(7): 2532-2546.
- SUN Jing, GUO Xuguang, YOU Xincan, et al. Characteristics and effective reservoir genesis of deep to ultra-deep tight clastic reservoir of Junggar Basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(7): 2532-2546.
- [8] 王芙蓉, 何生, 何治亮, 等. 准噶尔盆地腹部地区深层砂岩储层孔隙特征研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 547-552.
- WANG Furong, HE Sheng, HE Zhiliang, et al. The reservoir characteristic of deeply-buried sandstone in the center of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2010, 32(6): 547-552.
- [9] 徐春春, 邹伟宏, 杨跃明, 等. 中国陆上深层油气资源勘探发现现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1139-1153.
- XU Chunchun, ZOU Weihong, YANG Yueming, et al. Status and prospects of exploration and exploitation of the deep oil & gas resources onshore China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(8): 1139-1153.
- [10] 朱光有, 孙崇浩, 赵斌, 等. 7 000 m以深超深层古老缝洞型碳酸盐岩油气储层形成、评价技术与保存下限[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 587-601.
- ZHU Guangyou, SUN Chonghao, ZHAO Bin, et al. Formation, evaluation technology and preservation lower limit of ultra-deep ancient fracture-cavity carbonate reservoirs below 7 000 m [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(5): 587-601.
- [11] 唐勇, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148.
- TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 132-148.
- [12] 钟大康, 朱筱敏, 张枝焕, 等. 东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 95-98.
- ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, ZHANG Zhihuan, et al. Controlling factors of sandstone reservoir of the Paleogene in Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 95-98.
- [13] 李会军, 吴泰然, 吴波, 等. 中国优质碎屑岩深层储层控制因素综述[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 76-82.
- LI Huijun, WU Tairan, WU Bo, et al. Distribution and controlling factors of high quality clastic deeply buried reservoirs in China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 76-82.
- [14] 黄洁, 朱如凯, 侯读杰, 等. 深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 76-82.
- HUANG Jie, ZHU Rukai, HOU Dujie, et al. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep clastic reservoir [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 76-82.
- [15] 郑超, 李静, 高达, 等. 沙湾凹陷百口泉组层序地层及沉积体系研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 48-54.
- ZHENG Chao, LI Jing, GAO Da, et al. Study on sequence stratigraphy and deposit systems of the Baikouquan Formation in Shawan Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(6): 48-54.
- [16] 刘志峰, 印斌浩, 刘志鹏. 准噶尔盆地滴南凸起二叠系、三叠系层序地层格架的建立[J]. 地质与资源, 2013, 22(2): 120-124, 147.
- LIU Zhifeng, YIN Binhao, LIU Zhipeng. Permian and Triassic sequence stratigraphy framework of the Dinan uplift in Junggar Basin [J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(2): 120-124, 147.
- [17] 耳闯, 王英民, 颜耀敏, 等. 构造活动盆地层序地层特征与主控因素——以准噶尔盆地克-百地区二叠系为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1101-1108.
- ER Chuang, WANG Yingmin, YAN Yaomin, et al. Sequence stratigraphy characteristics and main controlling factors of the tectonic active basin: As an example from Permian of the Kebai area in the northwestern Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1101-1108.
- [18] 张关龙, 王继远, 王斌, 等. 准噶尔盆地腹部深层-超深层碎屑岩储层发育特征与孔隙演化定量表征[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 620-631.
- ZHANG Guanlong, WANG Jiyuan, WANG Bin, et al. Development characteristics and quantitative characterization of pore evolution of deep and ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 620-631.
- [19] 史燕青. 准噶尔盆地东南缘中二叠世-早三叠世构造-古地理演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- SHI Yanqing. Tectono-paleogeographic evolution during the middle Permian-Early Triassic in the southeastern margin of the Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [20] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- WANG Xulong, ZHI Dongming, WANG Yutao, et al. Source rocks and oil-gas geochemistry in Junggar Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [21] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 421-450.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar

- Basin, northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90 (3): 421-450.
- [22] 唐勇, 王智强, 庞燕青, 等. 准噶尔盆地西部坳陷二叠系下乌尔禾组烃源岩生烃潜力评价[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(4): 16-28.
- TANG Yong, WANG Zhiqiang, PANG Yanqing, et al. Hydrocarbon-generating potential of source rocks of Permian Lower Urho Formation in western depression, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(4): 16-28.
- [23] 白桦, 庞雄奇, 匡立春, 等. 准噶尔盆地深层油气藏形成条件分析[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 803-810, 820.
- BAI Hua, PANG Xiongqi, KUANG Lichun, et al. Formation conditions of deep hydrocarbon in Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 803-810, 820.
- [24] 何文军, 王绪龙, 邹阳, 等. 准噶尔盆地石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 2019, 24(2): 75-84.
- HE Wenjun, WANG Xulong, ZOU Yang, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of oil in Junggar Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24 (2): 75-84.
- [25] 孙靖, 尤新才, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地异常压力特征及其对深层-超深层致密储层的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 350-365.
- SUN Jing, YOU Xincan, XUE Jingjing, et al. Characteristics of abnormal pressure and its influence on deep and ultra-deep tight reservoirs in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44 (2): 350-365.
- [26] 王斌, 邱岐, 陆永潮, 等. 准噶尔盆地腹部上二叠统一下三叠统浅水辫状河三角洲沉积特征与模式[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 606-619.
- WANG Bin, QIU Qi, LU Yongchao, et al. Sedimentary characteristics and sedimentary model of the Upper Permian-Lower Triassic shallow braided river delta in the hinterland of the Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 606-619.
- [27] 张鹏辉, LEE Y I, 张金亮, 等. 砂岩储集层粒间孔隙保存机制[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 31-40.
- ZHANG Penghui, LEE Y I, ZHANG Jinliang, et al. Preservation mechanisms of intergranular pores in sandstone reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(7): 31-40.
- [28] HAY R L. Zeolites and zeolitic reactions in sedimentary rocks [M]. Boulder: Geological Society of America, 1966: 1-85.
- [29] 白清华, 柳益群, 樊婷婷. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及其成因分析[J]. 西北地质, 2009, 42(2): 100-107.
- BAI Qinghua, LIU Yiqun, FAN Tingting. Genesis and distribution of laumontite in Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42 (2): 100-107.
- [30] NOH J H, BOLES J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, North Tejon oil fields, California [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(2): 248-260.
- [31] 李振华, 邱隆伟, 师政, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳二段沸石类矿物成岩作用及其对油气成藏的意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 1-7.
- LI Zhenhua, QIU Longwei, SHI Zheng, et al. Diagenesis of zeolite minerals and its significance for hydrocarbon accumulation in the second member of Jiamuhe Formation of Zhongguai area, Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(1): 1-7.
- [32] 刘惠民, 张关龙, 范婕, 等. 准噶尔盆地腹部征沙村地区征10井的勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1118-1128.
- LIU Huimin, ZHANG Guanlong, FAN Jie, et al. Exploration discoveries and implications of Well Zheng 10 in the Zhengshacun area of the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1118-1128.
- [33] 操应长, 远光辉, 王艳忠, 等. 典型含油气盆地深层富长石碎屑岩储层长石溶蚀接力成孔认识及其油气地质意义[J]. 中国科学(地球科学), 2022, 52(9): 1694-1725.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, WANG Yanzhong, et al. Successive formation of secondary pores via feldspar dissolution in deeply buried feldspar-rich clastic reservoirs in typical petroliferous basins and its petroleum geological significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(9): 1694-1725.
- [34] 饶松, 朱亚珂, 胡迪, 等. 准噶尔盆地热史恢复及其对早—中二叠世时期盆地构造属性的约束[J]. 地质学报, 2018, 92 (6): 1176-1195.
- RAO Song, ZHU Yake, HU Di, et al. The thermal history of Junggar Basin: Constraints on the tectonic attribute of the Early-Middle Permian Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(6): 1176-1195.

(编辑 张 晟)