

苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油储层 成岩作用及孔隙演化特征 ——以 QY1 井为例

夏威, 蔡潇, 刘玉霞, 李辉, 朱一川

(中国石化华东油气分公司 勘探开发研究院, 江苏 南京 210000)

摘要:分析储层的孔隙发育特征及演化规律有助于明确油气富集规律和运移机理。对于苏北盆地溱潼凹陷 QY1 井岩心样品,采用矿物学、地球化学、热模拟等方法,研究储层的成岩作用阶段及类型、储集空间识别与划分,分析孔隙系统演化规律。结果表明:研究区页岩主要由长英质、碳酸盐和黏土等矿物组成,总有机碳质量分数平均为 1.33%,镜质体反射率为 0.88%~1.24%,孔隙度平均为 3.38%;层系储集空间分为裂缝和孔隙两大类,细分为 10 个亚类,储层处于中成岩演化阶段,经历压实、溶蚀、胶结、重结晶、交代等成岩作用,重结晶和溶蚀作用可形成粒间孔、溶蚀孔等,有利于储集空间发育;黏土矿物晶间缝和石英粒间孔对储层渗流能力起积极改善作用,随热演化程度变化,储集空间整体向增大的方向演化,成熟阶段储集空间以溶蚀孔为主,随成熟度升高,有机孔发育,且孔隙连通性逐渐改善,油气在储层内发生运移。该结果为苏北盆地页岩油储层富集机制和油气运移模式研究提供依据。

关键词:成岩作用;储集空间;孔隙演化特征;页岩油;阜宁组二段;溱潼凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)06-0098-14

0 引言

页岩油主要发育有效生烃泥页岩层系中的烃类,赋存状态包括游离态、吸附态、溶解态等^[1-3]。页岩油作为非常规油气资源的重要组成部分,处于技术快速发展和产业化成长阶段。目前,页岩油资源潜力大,世界页岩油(致密油)技术可采储量规模约为 3 450 亿桶,在全球原油供应量中占比约 10%^[4-7]。2019 年,美国页岩油/致密油产量为 3.5×10^8 t,占原油比例 1/2 以上^[6]。阿根廷上侏罗统 VacaMuerta 组页岩油预计可采储量为 25.8×10^8 m³^[8]。海相页岩油勘探开发实践表明,实现页岩油气勘探开发的关键在于加强基础地质认识,突破固有理论体系,并推动钻采工程技术革新^[9-13]。

中国页岩油资源丰富,页岩油勘探开发主要面向陆相盆地,在松辽、鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾、苏北等盆地实现页岩油商业突破^[14-16]。中国页岩油地质资源量为 397.46 亿吨,可采资源量为 34.98 亿吨^[17]。近年来,中国加大页岩油勘探开发力度,产量逐步提升。2020 年,苏北盆地溱潼凹陷的风险探井 SD1 井取得突破性进展,于阜宁组二段(阜二段)钻获厚度 390 m 优质页岩层,经水平井压裂改造后实现日产油 50 t 高产油流;次年实施的 QY1 评价井验证资源潜力,在厚度 423.6 m 黑色页岩层系中创下日产油 66.2 t 的工业油流纪录^[18-24],证实该凹陷具备规模化开发前景。

目前,陆相页岩油勘探处于初期阶段,探明储层成岩作用类型、孔缝发育特征及演化规律,有助于进一步研究油气富集机制和运移机理。邢乐乐等^[25]采用扫描电镜及图像分析技术,结合氮气吸附和核磁共振等实验方法,认为陆相页岩的孔隙演化模式受沉积—成岩—生烃作用共同控制。肖颖等^[26]采用多种岩石学实验方法,研究鄂尔多斯盆地延安地区延长组长 7 段纹层型页岩油储层,矿物组成、总有机碳(TOC)和纹层发育特征是储集空间发育的主控因素,TOC 在整个热演化阶段对页岩微孔的发育有重要控制作用。滕建彬^[27]应用岩石学、地球化学等方法,分析东营凹陷牛庄洼陷沙三段下亚段和沙四段上亚段页岩油储层生储品质机理,认为压实作用和物质质量分数是影响页岩孔隙度的主要因素,受控于生烃增压影响,陆

收稿日期:2025-06-13;编辑:关开澄

基金项目:中国石化科技攻关项目(P21112);中国石化科技攻关项目(P23190)

作者简介:夏威(1991—),男,硕士,工程师,主要从事非常规油气储层特征方面的研究。

源矿物总量与孔隙度呈正相关关系。

孔缝作为气藏运移、储集的主要场所,对天然气的富集、保存有直接影响^[28]。人们对页岩油储层成岩作用及孔隙影响因素进行研究,但对页岩油储层储集空间特征及分类未达成统一认识,且对苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油储层成岩作用及储集空间研究未深入开展。笔者以苏北盆地溱潼凹陷阜二段潜力页岩油储层为研究对象,采用矿物学、地球化学、热模拟实验等方法,分析页岩油储层成岩作用及孔隙演化规律,为苏北盆地页岩油储层富集机制和油气运移模式研究提供依据。

1 区域地质概况

苏北盆地是以扬子地台古生界褶皱为基底的盆地,主要出露中、新生界,发育建湖隆起、盐阜拗陷和东台拗陷,具有“一隆两拗”的构造特征^[29-30](见图1)。溱潼凹陷属于东台拗陷次级构造单元,为北东向南北超的箕状凹陷,面积约为1 100 km²^[31]。其中,阜二段泥页岩储层厚度为220~450 m,具有分布面积广、发育厚度大等特征,是页岩油勘探的主力层系。

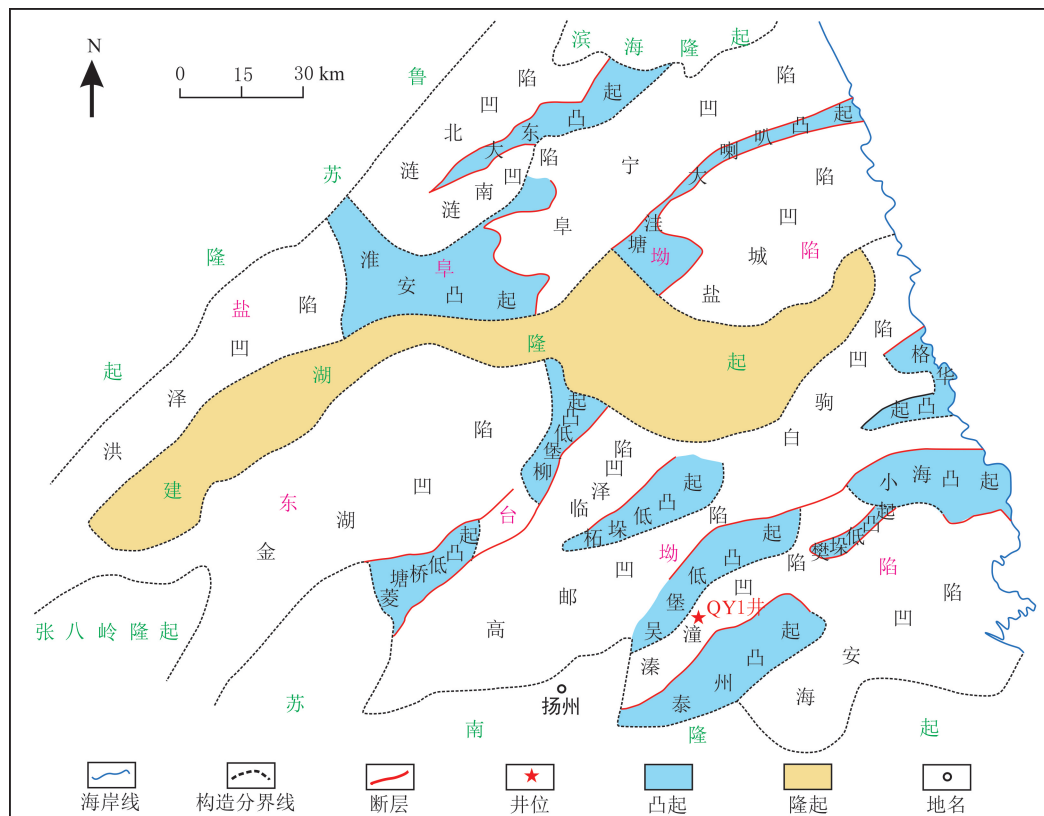


图1 苏北盆地构造单元分布及采样井位置
Fig.1 Tectonic units of Subei Basin and location of sampling well

2 实验样品和方法

2.1 样品

样品来自苏北盆地溱潼凹陷 QY1 井岩心,其中阜二段钻探深度为 3 633.00~4 056.60 m(见图2),实验结果见表1。矿物组成以黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物为主,其中,长石主要以斜长石为主,碳酸盐矿物中方解石平均质量分数为14.45%,白云石平均质量分数为11.09%,总有机碳 TOC 质量分数为0.30%~3.27%,平均为1.33%,镜质体反射率 R_o 为0.88%~1.24%,平均为1.04%,孔隙度平均为3.38%。

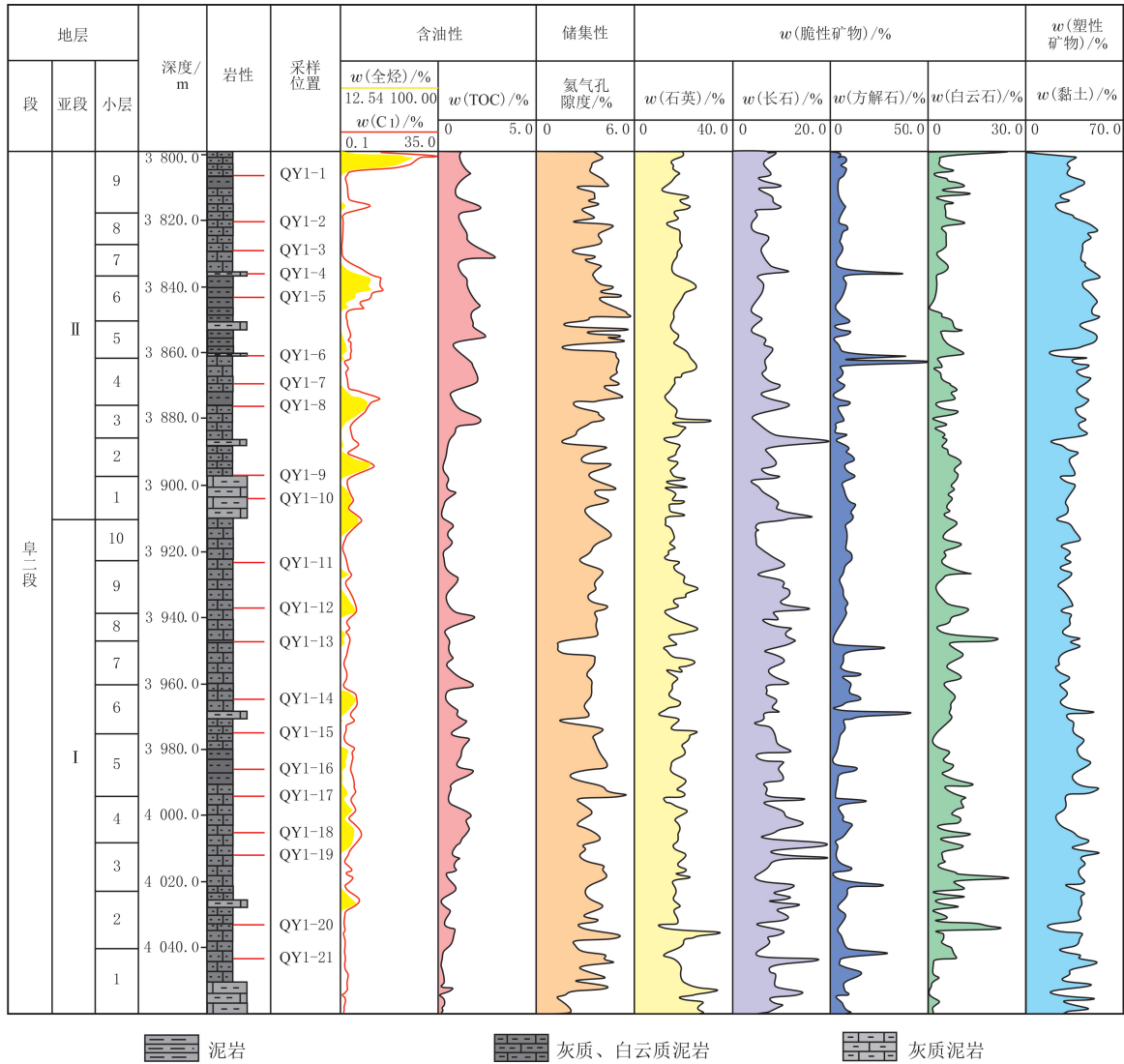


图 2 QY1 井卓二段综合柱状图

Fig. 2 Composite column arsection in the second member of Funing Formationin of well QY1

表 1 QY1 井实验数据

Table 1 Experimental data of well QY1

样品编号	深度/m	$w(\text{黏土})/\%$	$w(\text{石英})/\%$	$w(\text{钾长石})/\%$	$w(\text{斜长石})/\%$	$w(\text{方解石})/\%$	$w(\text{白云石})/\%$	$w(\text{黄铁矿})/\%$	$w(\text{其他矿物})/\%$	孔隙度/ $\%$	$w(\text{TOC})/\%$	$R_o/\%$
QY1-1	3 807.25	36.31	24.41	2.72	8.62	3.34	13.51	3.10	7.99	2.06	0.94	1.06
QY1-2	3 820.69	43.99	19.94	1.81	10.74	3.85	16.64	3.03	—	1.57	2.36	0.97
QY1-3	3 829.36	40.99	26.25	1.83	11.07	10.51	6.43	2.92	—	2.27	1.75	1.09
QY1-4	3 835.76	5.24	10.93	—	23.03	49.83	8.72	2.25	—	1.91	3.27	0.96
QY1-5	3 844.15	51.05	26.54	2.11	9.17	5.05	3.37	2.71	—	5.44	1.60	1.07
QY1-6	3 860.70	11.74	7.39	0.57	15.14	52.94	8.62	3.60	—	2.57	2.73	1.01
QY1-7	3 870.10	39.27	21.52	2.28	18.11	10.87	5.00	2.95	—	5.69	1.82	1.01
QY1-8	3 878.52	35.85	26.08	1.95	17.92	6.55	8.21	3.44	—	5.05	0.65	1.11
QY1-9	3 897.32	23.93	19.00	1.74	11.45	17.32	21.73	2.02	2.81	4.45	0.41	1.08
QY1-10	3 906.86	30.64	20.92	2.23	14.74	16.01	13.46	2.00	—	3.06	0.51	1.09
QY1-11	3 923.23	33.09	27.01	2.52	16.02	12.90	6.32	2.14	—	3.68	0.65	1.11
QY1-12	3 938.97	31.08	20.04	2.41	10.96	9.77	16.40	1.70	7.64	4.80	0.66	0.94

续表 1

样品编号	深度/m	$w(\text{黏土})/\%$	$w(\text{石英})/\%$	$w(\text{钾长石})/\%$	$w(\text{斜长石})/\%$	$w(\text{方解石})/\%$	$w(\text{白云石})/\%$	$w(\text{黄铁矿})/\%$	$w(\text{其他矿物})/\%$	孔隙度/ $\%$	$w(\text{TOC})/\%$	$R_o/\%$
QY1-13	3 948.99	12.02	8.98	1.60	22.93	38.10	12.91	3.46	—	0.41	1.72	1.24
QY1-14	3 966.40	22.33	29.71	2.60	15.32	6.23	21.90	1.91	—	3.98	1.39	1.06
QY1-15	3 976.62	28.64	33.84	2.84	16.30	6.53	3.17	6.64	2.04	4.69	1.03	1.10
QY1-16	3 985.93	21.58	21.45	1.57	18.72	20.21	10.84	5.63	—	1.95	1.57	0.88
QY1-17	3 995.68	27.67	19.95	2.08	13.80	6.50	25.03	4.97	—	4.80	1.35	0.89
QY1-18	4 005.30	30.01	25.33	2.07	14.95	10.50	13.00	4.14	—	3.70	0.83	1.04
QY1-19	4 014.24	36.30	26.33	2.36	14.21	2.99	14.13	3.68	—	2.55	1.49	0.88
QY1-20	4 034.90	16.16	51.28	2.74	19.12	7.70	1.95	1.05	—	3.79	0.30	1.19
QY1-21	4 043.72	28.82	26.90	1.71	32.80	5.66	1.51	2.60	—	2.50	0.99	1.04
平均值/ $\%$		28.89	23.51	2.09	15.96	14.45	11.09	3.14	5.12	3.38	1.33	1.04

2.2 方法

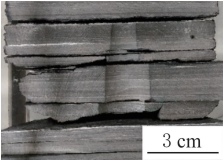
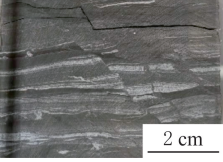
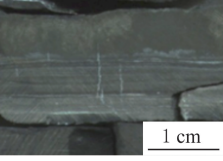
岩石矿物组分分析由日本理学 Ultima IV 型多功能 X 线衍射系统,以及德国蔡司 Axio Imager A2 POL 透射偏光显微系统协同完成。总有机碳质量分数测定使用美国力可公司 CS-230 碳硫分析系统,镜质体反射率检测由德国蔡司 MY9000 显微光度计完成。采用美国岩心公司 PoroPDP-200 型覆压孔渗联测装置获取孔隙度数据。岩石微观结构表征测试方面,使用德国莱卡 TIX 3C 多功能离子束切割系统制备样品,再采用德国蔡司 SIGMA 场发射扫描电镜观测亚微米级孔隙结构。全部实验流程在中国石化华东油气分公司实验研究中心实施完成。

3 储集空间类型及分类

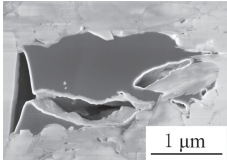
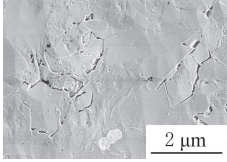
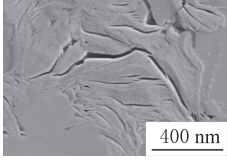
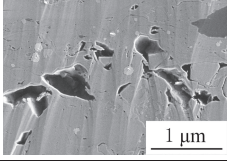
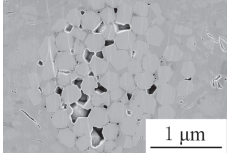
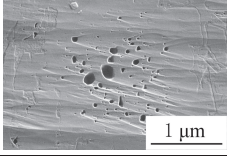
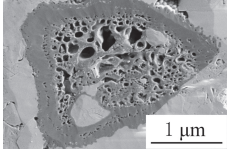
运用岩心观察、薄片分析、场发射扫描电镜观测等方法,根据发育规模将苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油储层储集空间分为裂缝和孔隙两大类,根据成因类型、发育场所、赋存形式等细分为纹层缝、构造缝、生烃缝等 10 个亚类(见表 2)。溱潼凹陷阜二段页岩油储层裂缝主要以纹层缝、晶间缝为主,孔隙主要以粒间孔为主。

表 2 苏北盆地阜二段页岩油储层储集空间分类

Table 2 Classification of reservoir spaces of shale oil reservoir in the second member of Funing Formation, Subei Basin

大类	亚类	岩心特征	特征描述	成因类型
	纹层缝		沿水平方向发育的层理或纹层间裂缝,局部含油或填充碳酸盐矿物	成岩作用
裂缝	构造缝		多为高角度裂缝,常被碳酸盐矿物填充,裂缝内可见油,局部表现为微断层状	构造作用
	生烃缝		垂直于纹层向上、下两端展布的锯齿状裂缝,多为碳酸盐矿物填充	生烃作用

续表 2

大类	亚类	岩心特征	特征描述	成因类型	
裂缝	收缩缝		有机质、黏土矿物与碎屑颗粒间形成的微裂缝,多为脱水后体积变小而形成	成岩作用、生烃作用	
	粒缘缝		碎屑颗粒间存在裂缝,沿矿物颗粒边缘展布,缝宽为数十纳米	成岩作用	
	晶间缝		多见于黏土矿物,是其层片间的裂缝,沿黏土矿物层片展布	成岩作用	
孔隙	粒间孔		多为石英、长石等碎屑颗粒间发育的类孔隙,孔径从数百纳米至数微米不等	成岩作用、原生孔隙	
	粒内孔	晶间孔		多为黄铁矿、金红石等自生矿物单个晶体间存在的孔隙,孔径多为数十或数百纳米	成岩作用、次生孔隙
		溶蚀孔		多发育在方解石、白云石、长石等矿物表面,局部可见黄铁矿溶蚀孔,孔径不超过 300 nm	溶蚀作用、次生孔隙
	有机孔		有机质生烃形成的孔隙,孔径从数十纳米至数百纳米不等,孔隙多为圆形	生烃作用、次生孔隙	

3.1 裂缝

结合岩心观察、薄片、扫描电镜分析,根据成因类型将裂缝分为纹层缝、构造缝、生烃缝、收缩缝、粒缘缝、晶间缝 6 个亚类(见表 2)。

纹层缝是沿水平方向发育的层理或纹层间裂缝,局部含油或填充碳酸盐矿物,主要形成于沉积阶段,因沉积环境、气候变化等因素变化而产生微裂缝。一般,纹层缝缝宽为毫米—微米级。构造缝主要是受构造作用影响而在储层内部形成,多为高角度裂缝,常被碳酸盐矿物填充,裂缝内可见油,局部表现为微断层状,发育规模跨度较大,为厘米—毫米—微米级。生烃缝是由生烃作用形成的异常高压导致岩石破裂而形成的,多为不规则破裂,主要是垂直于纹层向上、下两端展布的锯齿状裂缝,多为碳酸盐矿物填充,发育规模一般为毫米—微米级。收缩缝多发育于黏土矿物或有机质边界,主要是由脱水导致体积收缩而形成的,发育规模一般较小,多为微米—纳米级,多呈不规则网状、多边形或平行排列。收缩缝可对孔隙、裂缝起到一定沟通作用,有利于增强储层渗透性能。粒缘缝作为储层最常见的储集空间之一,多见于矿物颗粒间,包括长英质颗粒和碳酸盐颗粒等,不同成岩作用的粒缘缝形成原因也不同。由于石英颗粒较为稳定,粒缘

缝多是受压实作用影响而形成,长石及碳酸盐矿物受溶蚀作用明显,粒缘缝多为粒缘溶蚀缝。粒缘缝周围的矿物边界处呈多种样式的微裂缝,沿矿物颗粒边界展布,起沟通孔缝、改善油气运移通道作用,发育缝宽为数十纳米,一般为微米—纳米级。晶间缝是在成岩作用过程中形成的微裂缝,多见于黏土矿物、云母,是黏土矿物层片间的裂缝,沿层片展布,发育规模多为纳米级。

3.2 孔隙

孔隙通常发育规模较小,起沟通储层、提供油气运移通道作用,是不容忽视的储集空间。根据发生场所,可细分为粒间孔、粒内孔、有机孔。

粒间孔即矿物颗粒间存在的孔隙,多在石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等颗粒间,孔径从数百纳米至数微米。根据成因类型将粒内孔进一步分为晶间孔和溶蚀孔。晶间孔是在成岩过程中形成的孔隙,多为黄铁矿、金红石等自生矿物单个晶体间存在的孔隙,孔径多为数十或数百纳米。溶蚀孔是受溶蚀作用影响而形成的孔隙,多在方解石、白云石、长石等矿物粒内,局部可见黄铁矿溶蚀孔,孔径一般不超过 300 nm。有机孔是在有机质内的孔隙,孔隙多为圆形,是主要受生烃作用影响而形成的次生孔隙,孔径从数十纳米至数百纳米。

4 成岩作用

4.1 成岩作用划分

根据镜质体反射率实验结果(见表 1),苏北盆地溱潼凹陷阜二段 R_o 在 0.88%~1.24% 之间,属于中成岩阶段。结合薄片分析、扫描电镜观察等实验结果,将成岩作用划分为压实作用、胶结作用、溶蚀作用、重结晶作用、交代作用等(见图 3)。

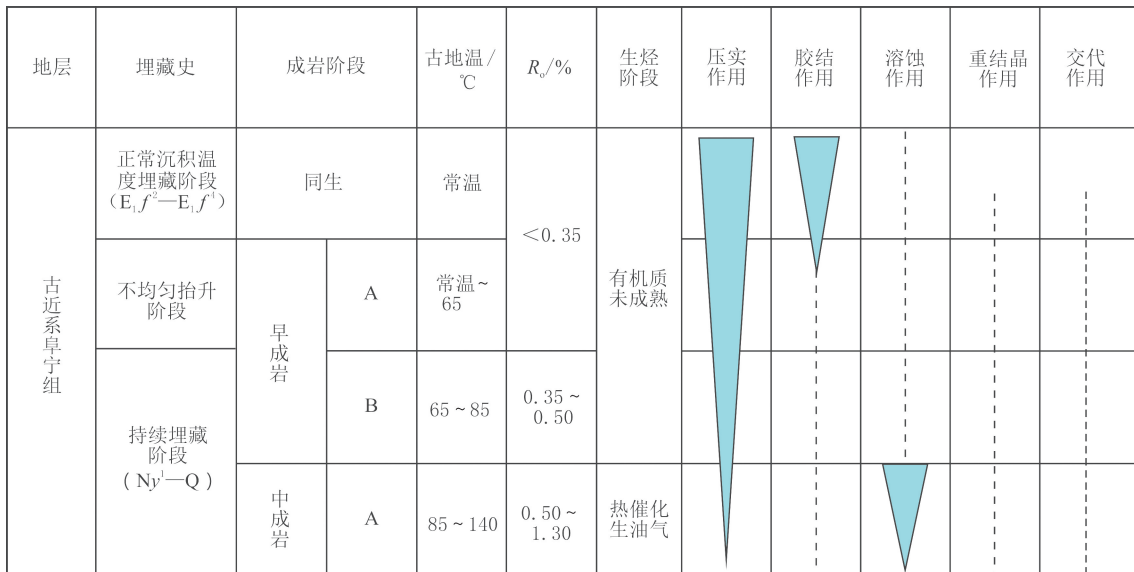


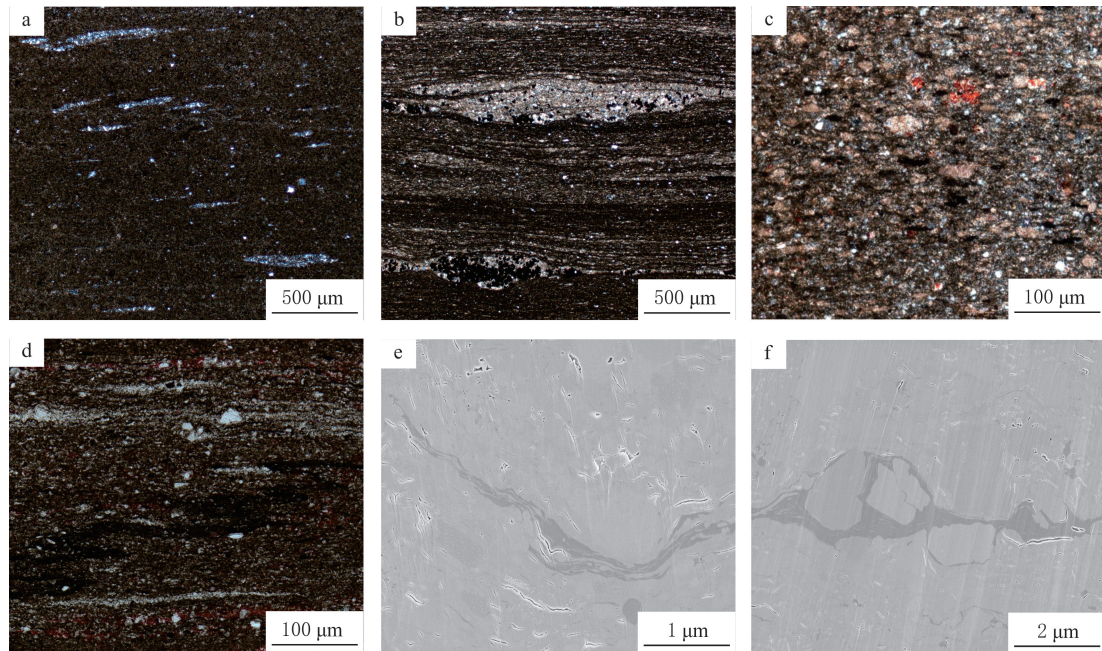
图 3 研究区 QY1 井成岩作用划分示意

Fig. 3 Classification diagram of diagenesis of well QY1 in study area

4.2 成岩作用类型

4.2.1 压实作用

薄片及扫描电镜实验中,观察到粉砂质组分呈透镜体沿岩层方向定向排列(见图 4(a-b))、矿物长轴沿纹层方向定向排列(见图 4(c))、刚性矿物压迫泥质纹层、有机质条带变形(见图 4(d-f))等。从沉积物形成开始,压实作用贯穿整个成岩阶段,在压实作用下,沉积物颗粒间孔隙不断压缩,储层整体孔缝体积不断减少,储层趋于致密,不利于后期油气运移。



(a) 白云石呈透镜体定向排列, 3 849.01 m, 正交光; (b) 岩屑呈透镜体定向排列, 3 886.85 m, 正交光; (c) 矿物颗粒沿长轴定向排列, 3 978.38 m, 正交光; (d) 泥质纹层受刚性矿物压迫变形, 3 986.69 m, 正交光; (e) 有机质条带受刚性矿物压迫变形, 3 683.60 m; (f) 有机质条带受刚性矿物压迫变形, 3 686.32 m

图 4 研究区 QY1 井压实作用特征

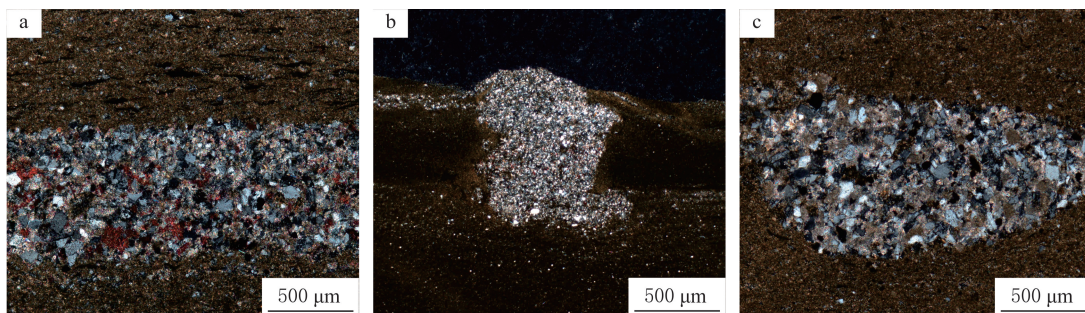
Fig. 4 Characteristics of compaction effects of well QY1 in study area

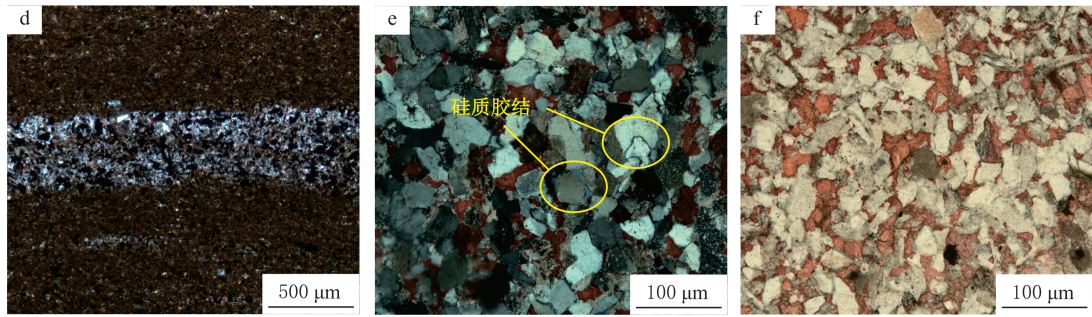
4.2.2 胶结作用

苏北盆地阜二段页岩储层常见胶结作用,有硅质胶结、钙质胶结等。胶结物形成后就近充填孔隙或喉道,储层孔隙度和渗透率降低,导致储层致密化,胶结作用对储层储集空间的发育以破坏作用为主。薄片观察显示,胶结作用在研究区阜二段普遍存在(见图 5)。其中,裂缝中充填的方解石以胶结物形式存在(见图 5(a-d)),硅质胶结产生石英次生加大(见图 5(e)),整体可见方解石胶结(见图 5(f)),储层孔隙空间进一步减少。

4.2.3 溶蚀作用

研究区 QY1 井溶蚀作用特征见图 6。由图 6 可知,方解石、长石、白云石、金红石、黄铁矿等矿物颗粒间可见受溶蚀作用产生的溶蚀孔,且不同矿物发育的溶蚀孔略有区别。方解石溶蚀孔一般孔径较大且集群分布,形态以圆形为主(见图 6(a)),部分溶蚀孔沿解理发育,呈矩形、三角形等棱角状(见图 6(b));长石溶蚀孔形态不规则且分布不均匀(见图 6(c));白云石溶蚀孔一般粒径较小(见图 6(d));金红石、黄铁矿发育的溶蚀孔一般在颗粒内部分布较均匀,金红石发育的溶蚀孔孔径大于黄铁矿溶蚀孔孔径(见图 6(e-f))。随沉积环境中流体的变化,溶蚀作用几乎贯穿沉积岩成岩全过程,尤其在中成岩阶段生烃作用后,有机酸形成,扩大碳酸盐、长石等矿物的溶蚀规模^[32]。溶蚀作用形成次生孔隙和扩展现有裂缝,显著提升储集性能。

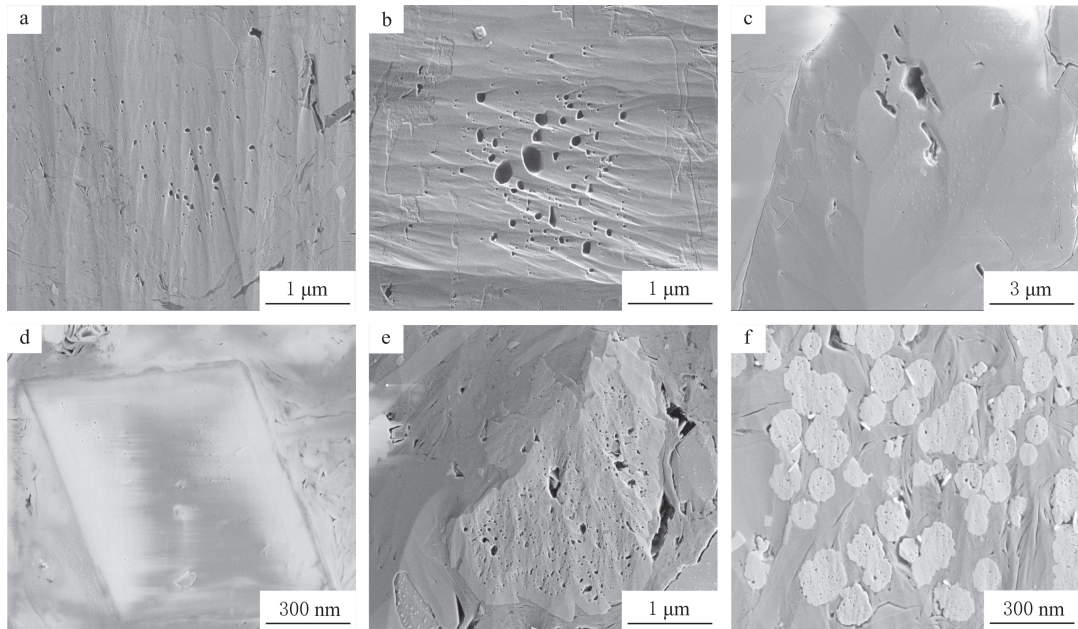




(a) 方解石主要以胶结物形式出现, 填充裂缝, 3 876.97 m, 正交光; (b) 方解石主要以胶结物形式出现, 填充孔隙, 3 879.61 m, 正交光; (c) 方解石主要以胶结物形式出现, 填充裂缝, 3 856.54 m, 正交光; (d) 方解石主要以胶结物形式出现, 填充裂缝, 3 853.45 m, 正交光; (e) 石英次生加大, 充填粒间孔, 3 917.92 m, 正交偏光; (f) 大量方解石胶结物, 充填长石、石英等粒间孔, 3 995.00 m, 单偏光

图 5 研究区 QY1 井胶结作用特征

Fig. 5 Characteristics of cementation effects of well QY1 in study area



(a) 方解石粒内溶蚀孔, 3 708.57 m; (b) 方解石粒内溶蚀孔, 3 780.62 m; (c) 长石粒内溶蚀孔, 3 734.54 m; (d) 白云石粒内溶蚀孔, 3 718.89 m; (e) 金红石粒内溶蚀孔, 3 933.86 m; (f) 黄铁矿粒内溶蚀孔, 3 998.78 m

图 6 研究区 QY1 井溶蚀作用特征

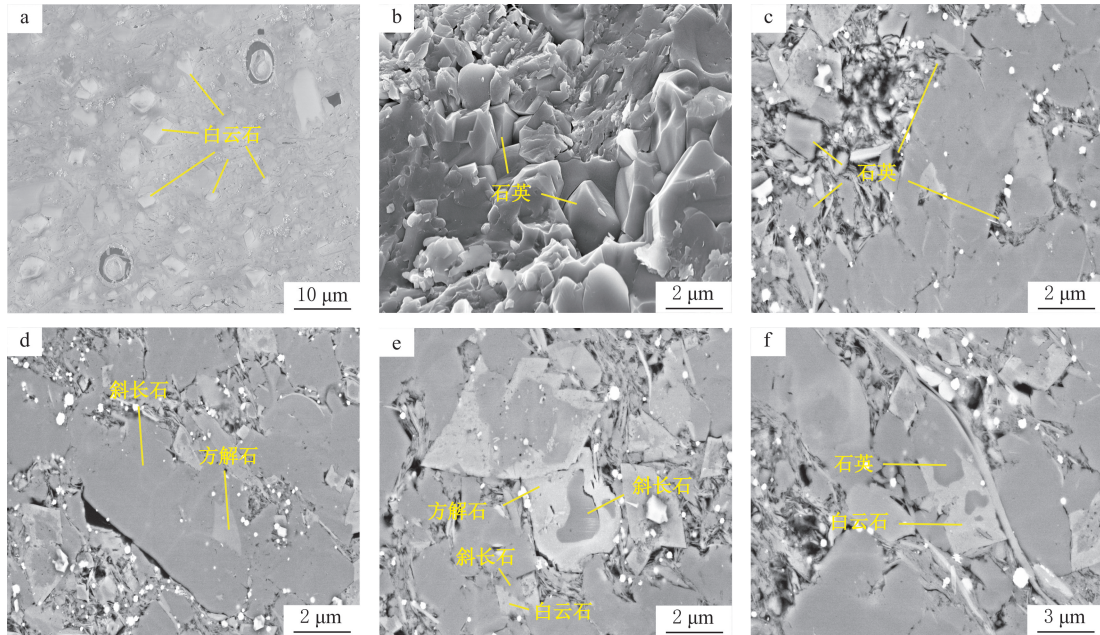
Fig. 6 Characteristics of dissolution effects of well QY1 in study area

4.2.4 重结晶作用

重结晶是由于温度、压力或流体作用, 矿物颗粒通过溶解一再沉淀形成更粗大、更稳定晶体的过程。研究区 QY1 井重结晶作用、交代作用特征见图 7。由图 7 可知, 部分层段白云石化作用发育大量白云石晶体(见图 7(a))。在黏土矿物演化过程中, 石英通常作为中间产物而生成, 研究区部分层段可见自生石英发育(见图 7(b-c)), 自生石英颗粒形成相互叠置, 在颗粒周缘形成新的粒间孔隙, 粗大晶体结构能更好抵抗埋藏压实, 有利于孔隙保存。

4.2.5 交代作用

由图 7(d-f) 可知, 研究区储层中普遍存在交代作用, 见斜长石、石英、方解石相互交代现象, 证明研究区阜二段经历复杂的交代作用过程, 对储集空间的影响具有双重性。白云石交代方解石而产生晶间孔, 从而改善储层渗透率。硅质交代作用可部分或完全充填孔隙、裂缝。由图 7(f) 可知, 石英部分交代白云石, 对粒间孔、溶蚀孔等形成部分充填, 储层趋于致密化。对样品镜下观察发现, 硅质交代现象较为普遍。整体上, 交代作用对溱潼凹陷阜二段储层渗透性起消极作用。



(a) 自形白云石颗粒, 3 807.25 m; (b) 自生石英颗粒, 3 923.23 m; (c) 自生石英颗粒, 3 976.62 m; (d) 方解石交代斜长石, 3 878.52 m; (e) 斜长石交代方解石、白云石, 3 966.40 m; (f) 石英交代白云石, 4 005.30 m

图 7 研究区 QY1 井重结晶作用、交代作用特征

Fig. 7 Characteristics of recrystallization and replacement effects of well QY1 in study area

5 孔隙发育控制因素及演化特征

为探讨溱潼凹陷阜二段储层储集空间发育控制因素,分析孔隙度与部分矿物质量分数、 $w(\text{TOC})$ 相关关系(见图 8)。由图 8 可知,孔隙度与黏土矿物、石英质量分数呈弱正相关关系,说明黏土矿物晶间缝和石英粒间孔是储层储集空间的重要贡献者,能有效提升储层储集性能,改善储层物性。孔隙度与方解石质量分数、 $w(\text{TOC})$ 呈弱负相关关系,说明方解石内普遍发育的溶蚀孔及有机质内发育的有机孔,对储层渗

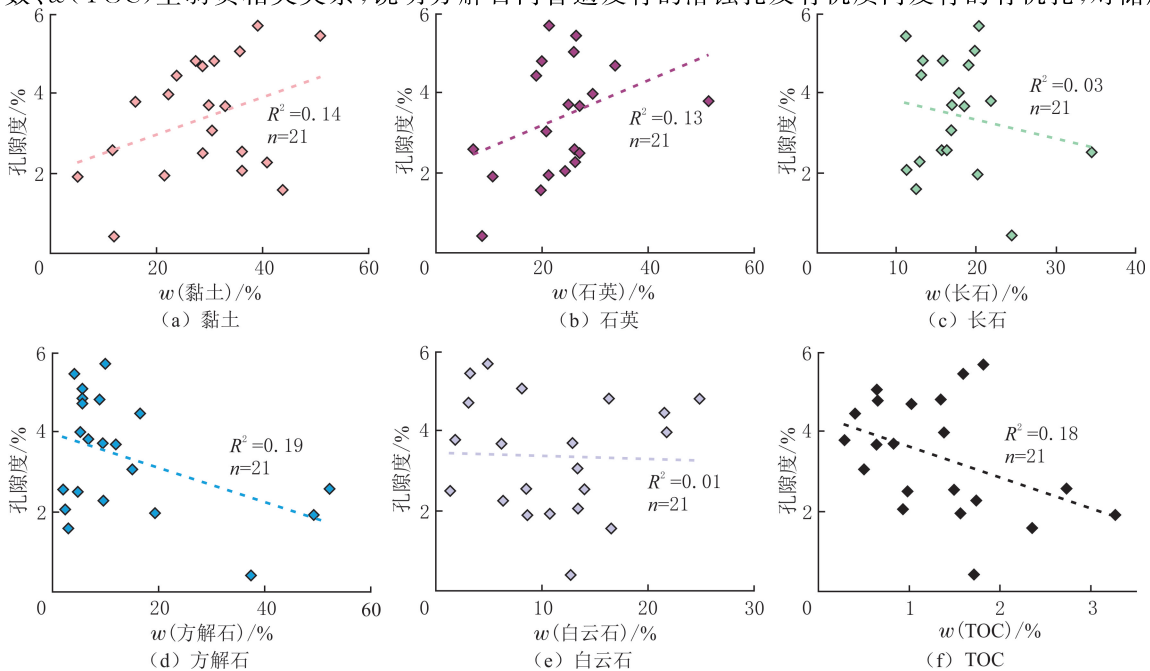


图 8 研究区孔隙度与矿物质量分数、 $w(\text{TOC})$ 相关关系

Fig. 8 Correlation between porosity and mineral content and $w(\text{TOC})$ in study area

透性能的改善作用不大,大量以胶结物形式发育的方解石充填矿物粒间孔,堵塞渗流通道;有机质虽能提供有机质孔隙,但在溱潼凹陷阜二段并非主要类型,且有机质多发育于矿物粒间,在有机质进入生气阶段前,对粒间孔的发育具有一定抑制作用。孔隙度与长石、白云石质量分数未发现明显的相关关系,长石粒间孔、粒内溶蚀孔和白云石溶蚀孔并非页岩孔隙系统的主要贡献者。黏土矿物晶间缝和石英粒间孔通常具有一定的延伸性,对其他储集空间起一定程度的沟通作用,对储层渗流能力起改善作用,而溶蚀孔通常为相互孤立的“死孔”,对储层渗流能力的改善作用有限。

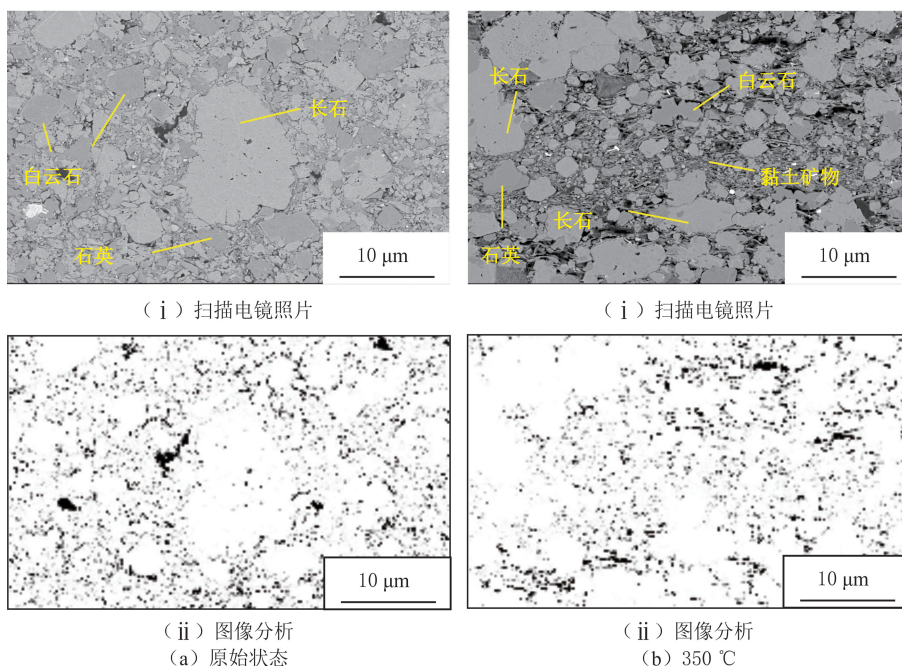
为明确成岩演化过程中的孔隙结构演化规律,设计热压模拟实验。实验在高温高压反应釜内进行,共设计三组实验,实验温度分别为 350、365、380 °C,对应的压力分别为 20、25、30 MPa(见表 3)。实验过程中,每组实验加入去离子水 150 mL,升温 4 h 后保持恒温 48 h。样品实验前先抛光处理,在扫描电镜下观察储集空间发育情况。选取包含多种储集空间类型的抛光样品进行热模拟实验,实验选取深度为 3 906.86 m 的样品。实验过程中,抛光样品发生不同程度破碎,未能获取原位图像信息。选取与初始状态具有相似储集空间类型的邻近视域进行分析,结合图像分析软件统计储集空间面孔率信息。为减少面孔率统计系统误差,提升结果准确性,扫描电镜图像亮度、对比度保持一致,在图像分析处理中,灰度分割阈值设置为 20%。由三组实验扫描电镜图像(见图 9)及表 3 可知,热演化过程中,基质面孔率不断增加,从 5.7% 增加至 17.9%,其中,碳酸盐矿物、长石发育溶蚀孔,以及黏土矿物晶间缝发育是面孔率不断增加的重要原因,随热演化程度的进行,储集空间逐渐增大。

表 3 研究区孔隙结构演化热压模拟实验数据

Table 3 Statistical analysis of experimental data from thermal compression simulation on pore structure evolution in study area

组号	初始温度/°C	温度/°C	压力/MPa	面孔率/%
a	25	—	—	5.7
b	25	350	20	14.8
c	25	365	25	16.4
d	25	380	30	17.9

在成岩演化过程中,随储层成熟度逐渐增加,孔隙体积变化规律不同(见图 10)。在 $R_o < 0.7\%$ 的低成熟阶段,储层中的储集空间主要以孔径 $< 50\text{ nm}$ 的矿物粒间孔为主,随压实作用增加,孔隙体积不断被压



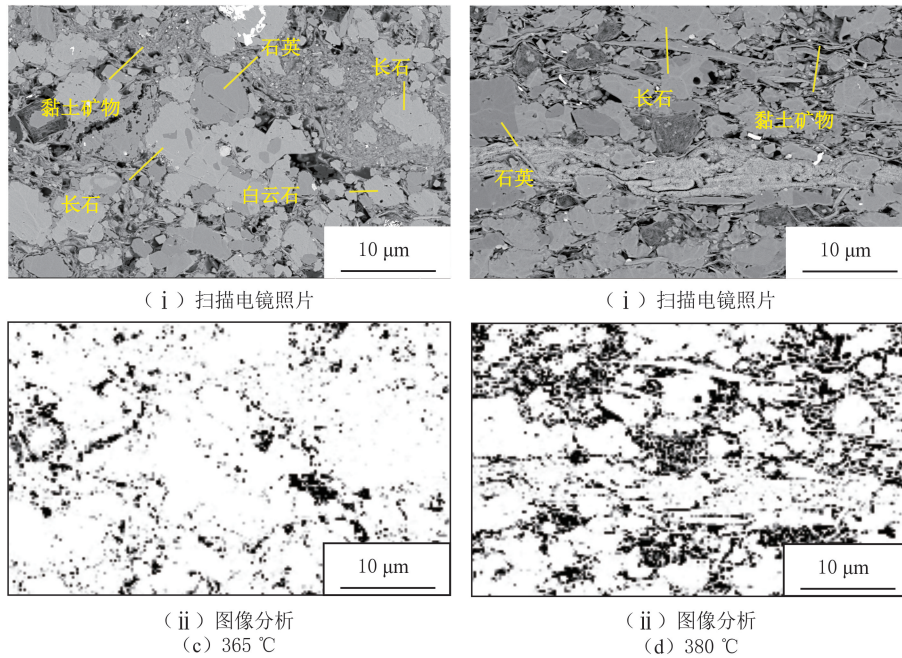


图 9 不同温度下研究区储集空间面孔率演化

Fig. 9 Evolution of reservoir spaces and pore-plane ratio under different temperatures in study area

缩,呈减小的趋势。当 R_o 达到 0.7% 时,储层进入成熟阶段,生烃作用开始进行,有机酸不断形成,储集空间发育主要受溶蚀作用影响,碳酸盐矿物、长石等溶蚀孔发育增多,导致大孔体积急剧增加。当 R_o 为 0.8%~0.9% 时,滞留油含量较高,烃类从有机孔逐渐向粒间孔等储集空间运移并充填原有孔隙,大孔体积呈减小趋势。进入高成熟阶段后,复杂的成岩作用进一步压缩孔隙体积,随有机质进入湿气—凝析油阶段,部分页岩油可能裂解为轻质油或伴生气,有机孔开始形成,且有机孔发育规模向增大、集群发育的方向演化,整体孔隙体积增加,储层整体孔隙连通性逐渐改善,油气在储层内发生运移。

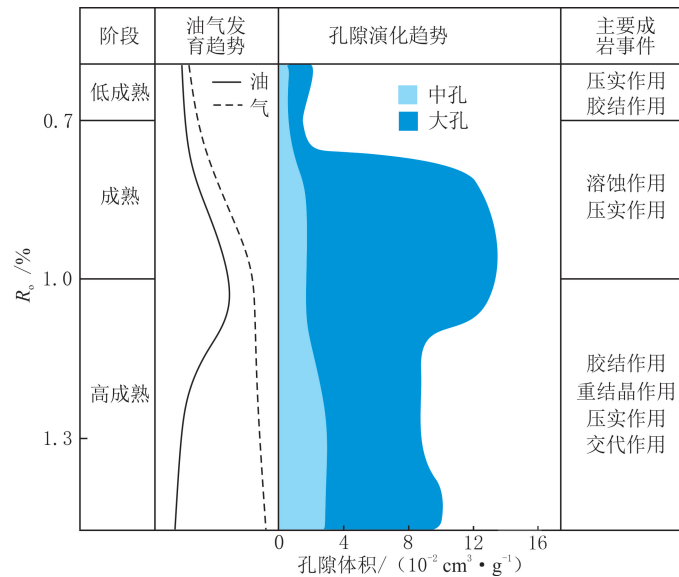


图 10 研究区孔隙演化模式

Fig. 10 Pore evolution model of study area

在热模拟实验基础上,分析储集空间演化模式(见图 11)。在储层形成过程中,储集空间演化受多种成岩作用共同影响。沉积初期,松散沉积物间发育大量粒间孔(见图 11(a)),随压实作用进行,粒间孔被

不断压缩(见图 11(b))。早一中成岩阶段,随有机酸形成,溶蚀作用逐渐占主导地位,在碳酸盐颗粒、长石颗粒等内部产生溶蚀孔(见图 11(c)),储层孔隙度上升;随生烃作用进行,烃类逐渐开始形成,并从有机孔逐渐向粒间孔扩散。在胶结作用影响下,钙质、硅质胶结物不断充填孔隙,粒间孔减少(见图 11(d))。在重结晶作用下,储层中可见自生石英颗粒生成(见图 11(e)),一方面,增加粒间孔发育规模;另一方面,作为刚性颗粒,自生石英颗粒可抵抗埋藏压实作用,一定程度上对孔隙保存起积极作用。

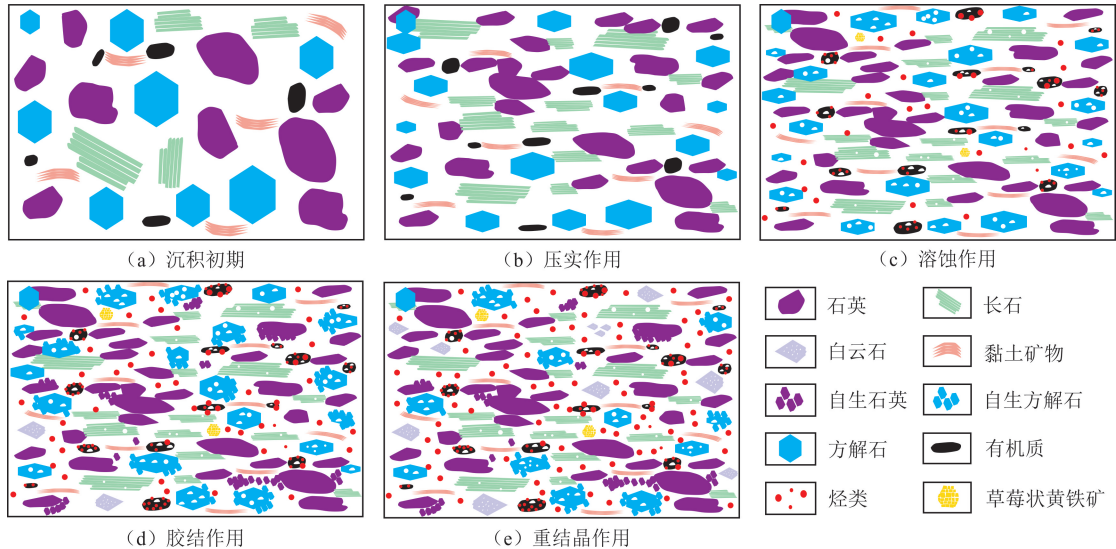


图 11 研究区成岩作用下储集空间演化模式

Fig. 11 Evolution model of reservoir spaces under diagenesis in study area

6 结论

(1) 苏北盆地阜二段页岩主要由长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物组成, TOC 质量分数平均为 1.33%, R_o 为 0.88%~1.24%, 孔隙度平均为 3.38%。

(2) 阜二段页岩储集空间分为裂缝和孔隙两大类, 细分为纹层缝、构造缝、生烃缝等 10 个亚类, 其中, 裂缝主要以纹层缝、晶间缝为主, 孔隙主要以粒间孔为主。

(3) 阜二段页岩储层处于中成岩演化阶段, 经历压实、溶蚀、胶结、重结晶、交代等成岩作用, 其中, 重结晶和溶蚀作用可形成粒间孔、溶蚀孔等, 有利于储集空间发育。

(4) 黏土矿物晶间缝和石英粒间孔对储层渗流能力起积极改善作用。随热演化程度的进行, 储集空间整体向增大的方向演化, 其中, 成熟阶段储集空间主要以溶蚀孔为主, 随成熟度升高, 有机孔发育, 且孔隙连通性逐渐改善, 油气在储层内发生运移。

参考文献 (References):

- [1] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-683.
- [2] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [4] 郭旭升, 蔡勋育, 刘金连, 等. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 12-22.

- GUO Xusheng, CAI Xunyu, LIU Jinlian, et al. Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. *Natural Gas Industry*, 2021,41(8):12-22.
- [5] 邹才能,赵群,丛连铸,等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. *天然气工业*, 2021,41(1):1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021,41(1):1-14.
- [6] U. S. Energy Information Administration. Drilling productivity report: for key tight oil and shale gas regions[R]. Washington, DC: EIA Independent Statistics & Analysis, 2020:25-32.
- [7] 侯连华,吴松涛,姜晓华,等. 页岩油地质评价实验方法现状、挑战与发展方向[J]. *石油学报*, 2023,44(1):72-90.
HOU Lianhua, WU Songtao, JIANG Xiaohua, et al. Situation, challenge and future direction of experimental methods for geological evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023,44(1):72-90.
- [8] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[R]. Washington, DC: U. S. Energy Information Administration, 2013:95-106.
- [9] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等. 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向[J]. *天然气工业*, 2023,43(6):1-14.
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development[J]. *Natural Gas Industry*, 2023,43(6):1-14.
- [10] 李宁,冯周,武洪亮,等. 中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展[J]. *石油学报*, 2023,44(1):28-44.
LI Ning, FENG Zhou, WU Hongliang, et al. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023,44(1):28-44.
- [11] 赵文智,朱如凯,胡素云,等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020,47(6):1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(6):1079-1089.
- [12] 吴松涛,朱如凯,罗忠,等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(5):62-72.
WU Songtao, ZHU Rukai, LUO Zhong, et al. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(5):62-72.
- [13] 王永诗,唐东. 咸化断陷湖盆典型页岩剖面地质特征:以东营凹陷为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2022,12(1):181-191.
WANG Yongshi, TANG Dong. Geological characteristics of typical shale profile in a saline lacustrine rift basin: a case study of Dongying Sag[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022,12(1):181-191.
- [14] 赵兰. 致密砂岩储层微裂缝发育特征及对物性的影响:以杭锦旗地区十里加汗区带为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2022,12(2):285-291.
ZHAO Lan. Development characteristics of microfractures in tight sandstone reservoir and its influence on physical properties: a case study of Shilijiahan Zone in Hangjinqi[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022,12(2):285-291.
- [15] 段宏亮,刘世丽,付茜. 苏北盆地古近系阜宁组二段富有机质页岩特征与沉积环境[J]. *石油实验地质*, 2020,42(4):612-617.
DUAN Hongliang, LIU Shili, FU Qian. Characteristics and sedimentary environment of organic-rich shale in the second member of Paleogene Funing Formation, Subei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020,42(4):612-617.
- [16] 郝石生,陈章明. 天然气藏的形成与保存[M]. 北京:石油工业出版社,1995:44-59.
HAO Shisheng, CHEN Zhangming. The formation and preservation of natural gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995:44-59.
- [17] 代波,李二党,王小军,等. 基于烃源岩地化参数评价页岩油运聚规律[J]. *油气藏评价与开发*, 2021,11(4):506-513.
DAI Bo, LI Erdang, WANG Xiaojun, et al. Evaluation of shale oil migration and accumulation rules based on geochemical parameters of source rocks[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2021,11(4):506-513.
- [18] 云露,何希鹏,花彩霞,等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023,44(1):176-187.
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong Sag of Subei Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023,44(1):176-187.
- [19] 姚红生,管灵,高玉巧,等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. *石油实验地质*, 2021,43(5):776-783.
YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Fuling Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021,43(5):776-783.
- [20] 管灵. 苏北盆地金湖凹陷北港次洼古近系阜宁组二段页岩油富集特征及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2020,42(4):618-624.
ZAN Ling. Enrichment characteristics and main controlling factors of shale oil reservoir in the second member of Paleogene Funing Formation, Beigang Subsag, Jinhu Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020,42(4):618-624.

- [21] 高玉巧,何希鹏,程熊,等.陆相咸化湖盆“低 TOC”烃源岩高生烃效率探讨:以苏北盆地溱潼凹陷阜二段泥页岩为例[J].油气藏评价与开发,2024,14(5):678-687.
GAO Yuqiao, HE Xipeng, CHENG Xiong, et al. Discussion on high hydrocarbon generation efficiency of saline lacustrine source rocks with low TOC: a case study of the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024,14(5):678-687.
- [22] 余文端,高玉巧,咎灵,等.溱潼凹陷阜二段泥页岩含油性及其富集层段分布[J].油气藏评价与开发,2024,14(5):688-698.
YU Wenduan, GAO Yuqiao, ZAN Ling, et al. Distribution of oil bearing and shale oil-rich strata in the second member of Funing Formation in Qintong Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024,14(5):688-698.
- [23] 王欣,韩建强,咎灵,等.苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油测井评价研究[J].油气藏评价与开发,2024,14(3):364-372.
WANG Xin, HAN Jianqiang, ZAN Ling, et al. Logging evaluation of shale oil in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024,14(3):364-372.
- [24] 姚红生,云露,咎灵,等.苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油定向井开发模式及实践[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):141-151.
YAO Hongsheng, YUN Lu, ZAN Ling, et al. Development mode and practice of fault-block oriented shale oil well in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023,13(2):141-151.
- [25] 邢乐乐,段宏亮,董足华,等.陆相页岩优势储集空间及其主控因素:以苏北盆地古近系为例[J/OL].断块油气田,2025,2:1857[2025-02-20].<https://link.cnki.net/urlid/41.1219>.
XING Lele, DUAN Hongliang, DONG Zuhua, et al. Advantage reservoir space in continental shale and its controlling factors: a case study of Paleogene in Subei Basin[J/OL]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025,2:1857[2025-02-20]. <https://link.cnki.net/urlid/41.1219>.
- [26] 肖颖,赵卫卫,李富康,等.鄂尔多斯盆地延安地区延长组长7段纹层型页岩油储集空间特征及其控制因素[J/OL].天然气地球科学,2025,6:1750[2025-01-15].<https://link.cnki.net/urlid/62.1177>.
XIAO Ying, ZHAO Weiwei, LI Fukang, et al. Reservoir space characteristics and controlling factors of stratified shale oil in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Yan'an Area[J/OL]. Natural Gas Geoscience, 2025,6:1750[2025-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177>.
- [27] 滕建彬.沉积和成岩作用交互约束页岩油生储品质机理分析:以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙河街组页岩为例[J].油气地质与采收率,2024,31(6):18-32.
TENG Jianbin. Mechanism of interaction influence between sedimentation and diagenesis on quality of shale oil generation and storage: a case study of Paleogene shale of Shahejie Formation in Niuzhuang Subbasin of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024,31(6):18-32.
- [28] 王晓明,陈军斌,任大忠.陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究进展及展望[J].油气藏评价与开发,2023,13(1):23-30.
WANG Xiaoming, CHEN Junbin, REN Dazhong. Research progress and prospect of pore structure representation and seepage law of continental shale oil reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023,13(1):23-30.
- [29] 高玉巧,蔡潇,夏威,等.苏北盆地古近系阜二段页岩油储集空间特征及甜点段评价:以溱潼凹陷 QY1 井为例[J].石油实验地质,2024,46(5):916-926.
GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin: a case study of well QY1 in Qintong Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024,46(5):916-926.
- [30] 陈洋,尹楠鑫,陈岑,等.陆相页岩油有机质来源与沉积环境分析:以苏北盆地高邮凹陷花庄地区古近系阜二段为例[J].东北石油大学学报,2024,48(6):17-30.
CHEN Yang, YIN Nanxin, CHEN Cen, et al. Organic matter sources and depositional environment analysis of continental shale oil: a case study of Paleogene second member in Funing Formation in the Huazhuang Area, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(6):17-30.
- [31] 蔡潇,夏威,马晓东,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜二段页岩油储集空间特征及其影响因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1482-1493.
CAI Xiao, XIA Wei, MA Xiaodong, et al. Storage spaces characteristics and influencing factors of shale oil reservoirs of Paleogene in Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(5):1482-1493.
- [32] 付林圃,王喜鑫,麻书玮,等.合水南地区长7段夹层型页岩油储层孔隙结构特征及主控因素[J].东北石油大学学报,2025,49(1):77-90.
FU Linpu, WANG Xixin, MA Shuwei, et al. Pore structure characteristics and main controlling factors of interbedded shale oil reservoirs of Chang 7 Member in South Heshui Area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2025,49(1):77-90.