陆相页岩储集空间微观组合类型及成因

张顺[1,2)]，刘惠民[1)]，王永诗[1)]，王敏[1,2)]
1) 中石化胜利油田勘探开发研究院，山东东营，257022；
2) 中国石化胜利油田博士后流动工作站，山东东营，257000

关键词：陆相页岩；储集空间组合；东营凹陷

东营凹陷作为渤海湾盆地断陷湖盆的典型，是胜利油田的重要工区。沙四中晚期—沙三时期是东营凹陷强烈断陷期，广泛分布的深水-半深水环境为泥页岩等细粒物质的沉积提供了有利的条件与场所。咸水-半咸水-淡水环境下的泥质白云岩、泥质灰岩、灰质泥岩、黏土岩和少量粉砂岩等细粒沉积岩构成了东营凹陷古近系一套重要的烃源岩，厚度达 200～400 m。自下而上可分沙四上亚段和沙三下亚段。伴随细粒沉积学和非常规储层地质学理论的不断深入，东营凹陷页岩油的相关基础研究工作一直在持续推进。随着页岩油评价方法日益完善，有必要进一步探讨页岩油储集空间组合类型。这有助于页岩有利储集层段和有利勘探目标的选取，对下一步页岩油勘探开发具有现实的指导意义。

1 页岩储层基本特征

东营凹陷古近系页岩以定向组构占绝对主导（对应纹层状和层状构造），方解石纹层与黏土矿物（或以黏土矿物为主的纹层）在垂向上的叠置是东营凹陷泥页岩最常见的纹层组合类型，韵律性或旋回性很强。方解石以泥晶结构为主，重结晶现象较普遍（姜在兴，2014）。泥页岩既有大量石英（平均 27%）、黏土矿物（平均 29%），也有碳酸盐矿物如（铁）方解石（6%～79%，平均＞30%）、白云石（3%～88%，平均＜20%）、铁白云石（2%～55%）等。有机质含量普遍较高，集中在 2.27%～6.7%，干酪根显微组分主要为腐泥组和镜质组；*Ro* 值集中在 0.51%～8.9%， t_{max} 值主要介于 433～448℃，(S_1+S_2)集中在 22～30 mg/g，生烃能力强，不同岩石类型及其组合（岩相）有机地化指标存在较大差异。孔隙度为 2.9%～12.4%；水平渗透率 0.038～3.46 mD；垂直渗透率为 0.0034～0.62 mD。储集层内孔径具有多尺度性，孔隙非均质性强。

2 储集微观组合类型及成因

陆相深水页岩储层孔隙类型多样（王永诗，2013）。黏土矿物晶间收缩缝、方解石重结晶晶间孔、白云石化晶间孔、有机质孔、溶蚀孔、异常高压缝、层间微缝等是研究区重要的储集空间类型。多数类型的孔隙并不是孤立发育的，彼此往往以相互连通或包含的方式形成孔隙（或微裂缝）的组合。在大量样品扫描电镜及岩石薄片观察分析基础上，将孔隙组合分为三类：①无机矿物晶间孔（缝）组合；②无机矿物孔（缝）与有机孔隙组合；③裂缝沟通基质孔隙组合。本文重点讨论①②两类。

2.1 无机矿物晶间孔（缝）组合

无机矿物晶间孔（缝）组合以粘土矿物晶间孔和碳酸盐矿物溶蚀孔最为常见。以纹层状亮晶灰岩为例，垂直纹层部分取直径约 1 mm 微样进行三维 CT 扫描（见图 1a-b），对截面部分进行孔隙图像识别提取（见图 1c），图 1e 不同颜色表征不同孔径大小的孔隙，图 1f 表征所有孔隙的空间发育特征。可以发现，无机孔隙集中发育在纹层界限近方解石纹层部分，顺纹层方向、同一纹层内部孔隙连通性好，多数连通呈微裂缝的形态。发育过程可概括为：伴随埋深增大，细粒物质固结成岩，黏土矿物脱水收缩并由蒙脱石向伊利石转化，微晶方解石向亮晶方解石转变，有机质开始生烃；黏土矿物进一步转化，发育近水平片状黏土矿物晶间孔，黏土层内有

注：本文为国家科技重大专项资助项目（编号: 2017ZX05049-004）的成果。
收稿日期：2019-01-10；改回日期：2019-03-20；责任编辑：章雨旭。 Doi：10.16509/j.georeview.2019.s1.097
作者简介：张顺，男，1985 年生，博士，高级工程师，地质学专业，Email：satisfactoryshun@163.com。

机质排烃排酸至纹层界面附近时，溶蚀重结晶近界面部分，在纹层界面部分发育大量溶蚀孔隙；烃类流体在溶蚀孔和黏土矿物晶间孔中富集，并在重结晶方解石的解理缝中运移，进一步溶蚀亮晶方解石晶体。最终在纹层界面部分形成碳酸盐矿物溶蚀孔与黏土矿物收缩晶间孔（及有机质孔）的储集空间组合类型，这种孔隙组合多在纹层界面以“缝”的形态显示（见图 1c）。

2.2 无机矿物孔（缝）与有机质孔隙组合

原始有机质在沉积后，后期成岩作用导致形态各异；以东营凹陷泥页岩层系中的白云岩为例，在白云石化过程中，碳酸盐矿物摩尔体积变化，容易产生矿物晶体间的孔隙。伴随后期成岩和生烃演化，易形成有无机孔缝与有机质孔隙的储集空间组合。成岩作用（或构造作用）使晶体间微裂缝发育，碳酸盐岩中的流态有机质通过这些微裂缝运移，并在局部富集，在适当的埋深成烃条件下再次发生裂解，随着有机质生烃演化释放比碳酸酸性更强的流体，溶蚀裂缝临近的白云石、方解石等，在这个过程中含大量碳原子的重质部分残留在裂缝内，表现出有机质体积收缩，与裂缝边缘的白云石晶内溶蚀孔沟通，逐渐形成有机质生烃孔缝-白云石晶内溶蚀孔的储集空间组合（图 2a）。此外，伴随着溶蚀作用的进行，圆形或椭圆形的晶内溶蚀孔大量发育，与黄铁矿晶间孔、方解石原生晶间孔形成晶间孔组合类型（属于类型①）（图 2b-d），这种由成岩作用主导发育的孔隙组合类型，还发育于纹层状云质或灰质泥页岩中。

3 结论

陆相页岩矿物类型丰富，储集空间类型多样。多数类型的孔隙并不是孤立发育的，彼此往往以相互连通或包含的方式形成孔隙（或微裂缝）的组合：①无机矿物晶间孔（缝）组合；②无机矿物孔（缝）与有机孔隙组合；③裂缝沟通基质孔隙组合。有机质生烃排酸和方解石、白云石等易溶碳酸盐矿物的溶蚀是有效储集空间组合发育的重要成岩作用。

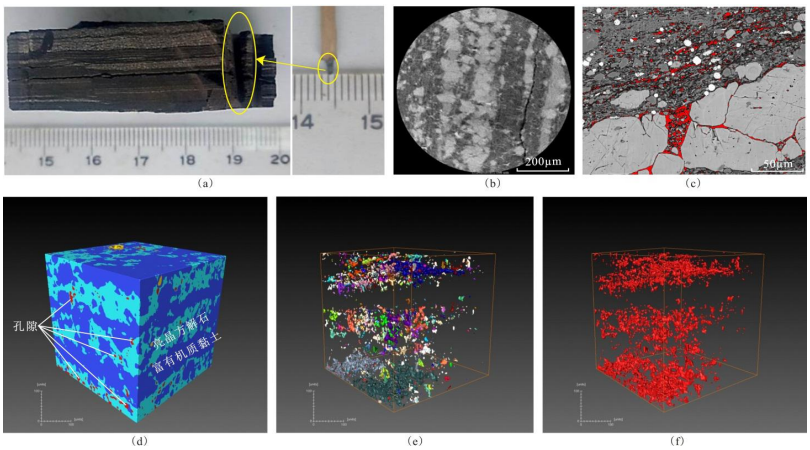

图 1　纹层状亮晶灰岩样品孔缝三维 CT 扫描表征图　（牛页 1 井 3413.8m，TOC=2.8%，Ro=0.89%，酸性流体环境）

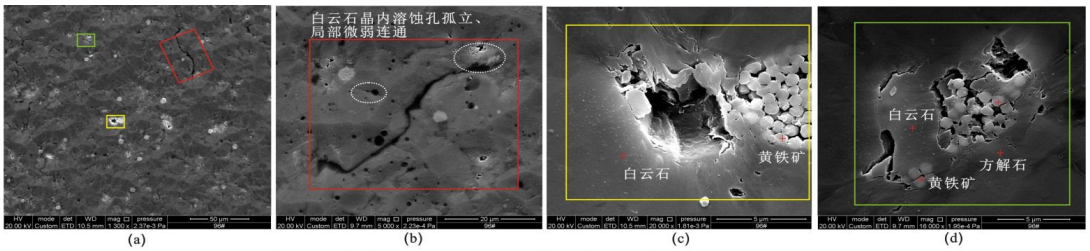

图 2　纹层状泥质白云岩无机矿物孔（缝）与有机质孔隙组合

参　考　文　献 / References

姜在兴，张文昭，梁超. 2014. 页岩油气储层基本特征及评价要素. 石油学报，35（1）: 184~196.

王永诗，李政，巩建强. 2013. 济阳坳陷页岩油气评价方法：以沾化凹陷罗家地区为例. 石油学报, 34(1): 83~91.

ZHANG Shun, LIU Huimin，WANG Yongshi，WANG Min: Types and genesis of microassemblage in continental shale reservoir space

Keywords: continental shale; reservoir spaces combination; Dongying sag