

文章编号: 1006-6616 (2017) 06-0829-09

南华北盆地偃龙地区二叠系泥页岩微观孔隙特征及其影响因素分析

陈静, 吴伟, 王娟, 黄雪峰

(河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000)

摘要: 运用氩离子抛光—场发射环境扫描电子显微成像测试技术, 对南华北盆地偃龙地区 ZK1614 井二叠系海陆交互相—陆相的泥页岩样品进行观察并获取二次电子及背散射信息。结合 X 射线能谱信息和 JMicroVision 软件灰度识别功能, 对样品矿物组成及微观孔隙特征进行定性分析和定量表征, 并探讨了孔隙发育分布的影响因素。研究发现: 样品主要发育的孔隙以无机矿物孔为主, 孔隙类型有粒内孔、粒间孔、少量有机质孔及微裂隙; 样品面孔率介于 0.92% ~ 5.53% 之间, 整体来看, 面孔率大小与孔隙数量正相关; 孔径大小介于 50 ~ 2000 nm 间, 不同区段的孔面积对数指标与单位面积孔数量对数指标呈两段式线性关系, 孔径较小时两者负相关, 孔径较大时两者正相关。不同矿物对孔隙的发育有不同的控制作用, 脆性矿物主要影响裂隙的发育, 对孔隙的发育有一定的抑制作用; 粘土矿物因构造应力、矿物相变及脱水等作用形成大量孔隙, 对孔隙的发育起一定的促进作用。研究区燕山期、喜山期因构造活动形成了大量尺度较大的裂隙, 裂隙的发育使岩层的渗流性能增加, 促进了有机酸和地层水对矿物的溶蚀作用, 相应的促进了孔隙的发育。此外, 随着埋藏深度的增加, 孔隙体积随着压实作用的增大而逐渐减小。

关键词: 南华北盆地; 二叠系; 泥页岩; 微观孔隙

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

随着页岩油气在世界化石能源结构中的份额逐渐增加, 页岩气勘探开发越来越受到重视。以沃斯堡盆地 Barnett 页岩产层为代表的美国页岩气开发已经进入商业性开发阶段^[1], 美国页岩气商业性开采的实现, 给全球页岩气领域带来了一场变革。我国对于页岩气的勘探开发开始较晚, 主要集中在四川盆地及其周缘海相泥页岩发育的区域, 以及元坝、新场、延长探区等陆相泥页岩发育区域^[2-4], 已经完钻一批先导实验井并获得了工业页岩气流, 页岩气累计产量突破 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5-7]。而针对海陆交互相的煤层页岩储层开展的研究较少, 暂未获得突破性成果。以南华北盆地偃龙地区东部 ZK1614 井上古生界海陆交互相—陆相泥页岩为研究对象, 利用氩离子抛光—

高分辨率场发射环境扫描电镜测试分析与图像分析统计方法, 探讨了微观孔隙特征及发育控制因素。

1 区域地质概况

研究区位于南华北盆地群豫西隆起区的中部(见图 1), 构造演化主要受秦岭—大别造山带及东部郯庐断裂的控制, 其特殊的大地构造位置, 造就了其复杂而独特的构造演化史。它的形成和发展大致经历了前中生代克拉通被动大陆边缘盆地、早中生代坳陷盆地、晚中生代前缘盆地和新生代断陷—坳陷盆地等演化阶段, 构造演化具有明显的多期次叠合、多样式构造作用的特点^[8-11]。经

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(41102059); 河南省高校科技创新团队支持计划(17IRTSTHN025)

作者简介: 陈静(1991-), 女, 硕士生, 从事油气地质, 含油气盆地分析等研究方向。E-mail: 18300600609@163.com

通讯作者: 吴伟(1979-), 男, 博士, 副教授, 从事沉积盆地分析与油气勘探研究。E-mail: wei@hpu.edu.cn

过多期次沉积充填过程, 研究区晚石炭—二叠系发育一套海陆交互相—陆相的含煤碎屑岩沉积, 是该区的主力烃源岩层系之一, 且研究区地层构造背景复杂, 岩性组合多样, 发育了良好的孔隙系统。随着我国油气勘探难度的增大, 南华北盆地仍旧具有很大的油气勘探潜力。

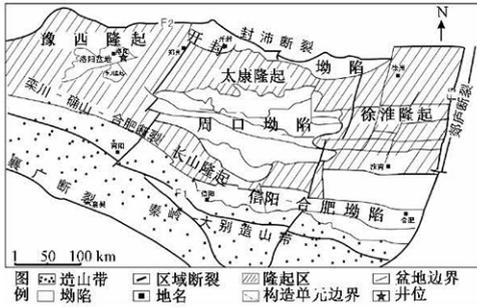


图1 南华北盆地构造单元划分及ZK1614井位图

Fig. 1 Division of tectonic units of the southern North China Basin and the location of the Well ZK1614

2 实验和研究方法

实验样品取自南华北盆地偃龙地区ZK1614井太原组、山西组和石盒子组, 共8件, 岩性主要为泥页岩。对所取样品进行岩石热解实验以及镜质体反射率测试, 获取样品有机地球化学数据, 所采用的实验仪器分别为YY-3000 A型岩石热解仪和DM LPWITH MSP20镜质组反射率测定仪。实验结果见表1所示。为避免样品中碎屑颗粒对微观孔隙的覆盖以及自然断面形成的假孔隙, 在进行扫描电镜观察之前先进行氩离子抛光, 所采用实验仪器为PECS II 685型氩离子抛光仪, 对微观孔隙形貌特征的观察利用扫描电镜进行, 实验仪器为FEI Quanta250 FEG-SEM场发射环境扫描电镜。

3 样品微观孔隙定性描述和定量表征

为精细观察泥页岩样品中微观孔隙的形态特征及发育分布规律, 利用场发射环境扫描电镜对氩离子抛光过后的样品进行高倍数镜下观察。在观察的过程中对某一选定区域进行连续性SEM图像拍摄, 获取背散射图像, 并利用图像分析软件

表1 样品地球化学测试数据

Table 1 Geochemical data of shale samples

样品编号	岩性	TOC/%	R _o /%	S ₁ + S ₂ / (mg/g)	T _{max} /°C
TY5	泥页岩	1.42	4.22	0.03	478
TY9	泥页岩	5.34	4.34	0.06	477
SX15	泥页岩	1.61	4.43	0.04	488
SX19	泥页岩	0.16	4.49	0.03	487
SX24	泥页岩	0.18	4.29	0.02	376
XSHZ35	泥页岩	1.21	4.6	0.04	473
XSHZ44	泥页岩	0.15	4.64	0.03	366
SSHZ54	泥页岩	0.21	—	0.02	446

注: “TOC”表示有机碳含量; “R_o”表示镜质体反射率; “S₁ + S₂”表示生烃潜力; “T_{max}”表示最高热解峰温; “—”表示无测试数据

(JMicroVision)进行微观孔隙的定量表征以及矿物组成的统计工作。

3.1 孔隙定性描述

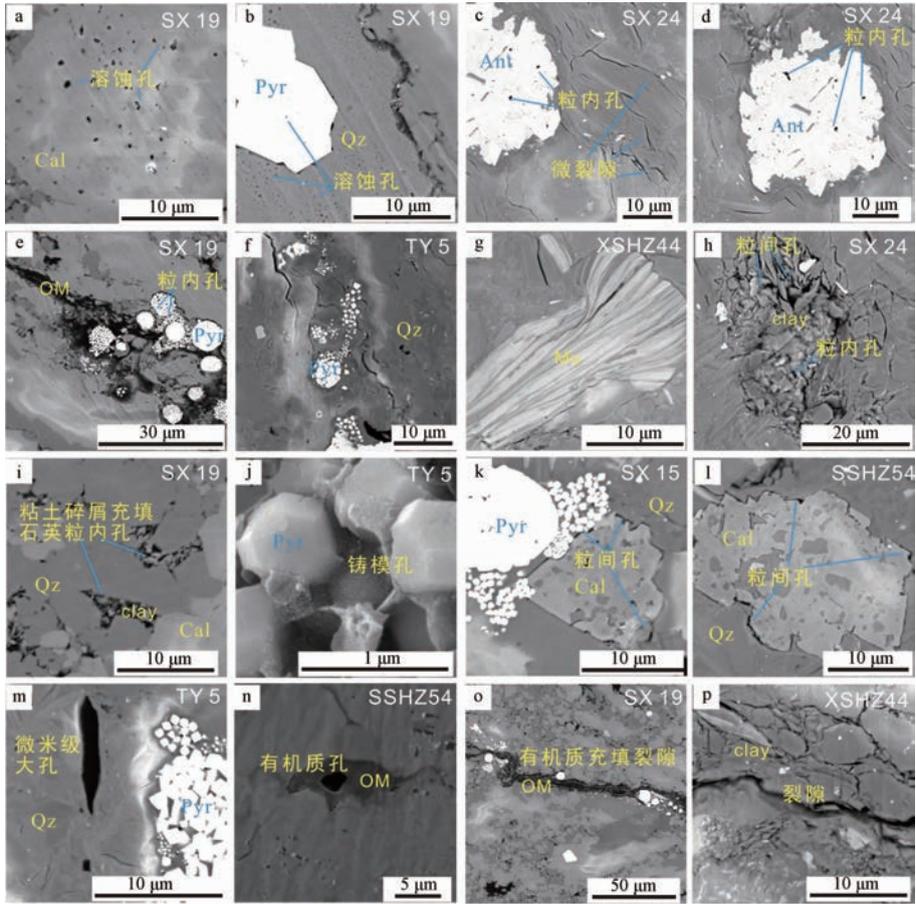
国内外学者对页岩孔隙的定性描述不尽相同, 主要依据孔隙形态^[12]、孔隙发育位置和成因^[13]、孔隙连通性^[14]及孔隙的分形^[15]等特征对孔隙类别进行划分。综合前人对泥页岩孔隙类型分类方案, 结合研究区实际情况将泥页岩中主要发育的孔隙类型划分为粒内孔、粒间孔、有机质孔及微裂隙。

(1) 粒内孔

不同类型矿物颗粒内部均发育有形态各异的粒内孔: 方解石内部常见大量的圆形溶蚀成因的粒内孔(图2a), 常常具有方向性和局部区块发育特征; 石英颗粒、斑状黄铁矿、金红石内部也发育圆形及其它不规则形态的粒内孔(见图2b、2c、2d), 但发育密度较小; 莓状黄铁矿颗粒内部晶粒与晶粒之间发育大量圆形、似圆形粒内孔(见图2e、2f); 片状云母颗粒内部也常常发育近似平行的长条状粒内孔(见图2g); 粘土矿物内部发育各类形态复杂的粒内孔(图2h), 其碎屑颗粒常充填其他矿物粒内孔中(见图2i), 或被有机质充填。超高倍数(10000倍以上)观察时, 可见黄铁矿铸模孔(见图2j)。

(2) 粒间孔

样品中粒间孔分布于不同矿物或者有机质之间, 其形态、规模和成因各异。在富含石英的岩样中有很多的不规则的粒间孔出现, 石英较其他矿物硬度较大, 埋深沉降的过程中因膨胀或收缩差异作用, 形成许多尖角直边或不规则的矿物粒间孔(见图2k、2l)。粘土矿物颗粒较细, 在埋深



Qz—石英; Cal—方解石; Pyr—英铁矿; Mu—云母; Ant—锐钛矿; Clay—粘土矿物; OM—有机质

图 2 微观孔隙形态及类型

Fig. 2 Morphology and type of microscopic pores

过程中, 因差异压实与热液蚀变等作用而形成较多粘土矿物粒间孔 (见图 2h)。粘土基质表面的粒间孔尺寸较大些, 孔隙形态多呈长条状、新月状等, 孔径尺度一般小于 5 μm 。石英与方解石颗粒之间常发育较大的粒间孔, 后期经溶蚀作用变大, 直径达到 10 μm 以上 (见图 2 m)。

(3) 有机质孔

有机质孔隙是指有机质团块内部或有机质生烃后由于体积缩小而形成的孔隙^[16] (见图 2n), 但是样品中有机质孔极其少见, 植物孢腔内一般都均被粘土矿物及其它矿物所充填, 而生烃作用形成的有机质孔也很少见。

(4) 微裂隙

通过扫描电镜不同放大倍数的镜下观察, 发现微观裂隙在各个样品中均十分发育。SX19 样品中的部分长裂隙中充填了残余沥青质 (见图 2o), 说明这类裂隙是泥页岩中烃类运聚的主要途径, 有机质生烃过程中所生成的天然气大部分从这类裂隙中运移逸散。低倍镜下的样品观察中

还可见到一些长度超过 10 μm 甚至 100 μm 的裂隙, 这些裂隙多具有一定的方向性而成组出现 (见图 2p)。

3.2 孔隙定量表征

按孔隙发育尺度进行孔隙分类有利于孔隙定量分析, 采用 Loucks^[17] 的划分方案将孔隙分为五类, 微孔 < 1 nm, 纳米孔 < 1 μm , 小孔 1 ~ 62.5 μm , 中孔 62.5 ~ 400 μm , 大孔 400 ~ 256000 μm 。文中定量分析的基础是扫描电镜 SEM 图片, 放大倍数为 10000, 受实验观察尺度限制, 观察到的孔隙为 50 ~ 2000 nm 范围, 大部分为 Loucks 定义的纳米孔量级。将每个样品连续采集的 50 张扫描电子显微镜背散射图像在 JMicroVision 软件进行伪彩色增强处理, 进行有机质、大裂隙剔除, 然后利用灰度阈值分割进行孔隙识别得到孔隙边界图形, 计算得到各个孔隙的孔径、面积等几何参数, 对于矿物含量的统计工作方法与孔隙统计方法一致。通过对孔隙发育的数量、孔径分布及孔隙面积等参数的分析处理, 获得不同样品的面孔率、不同孔

径分布的频率，从而对不同样品的孔隙发育规律 进行总结，统计结果见图 3、表 2。

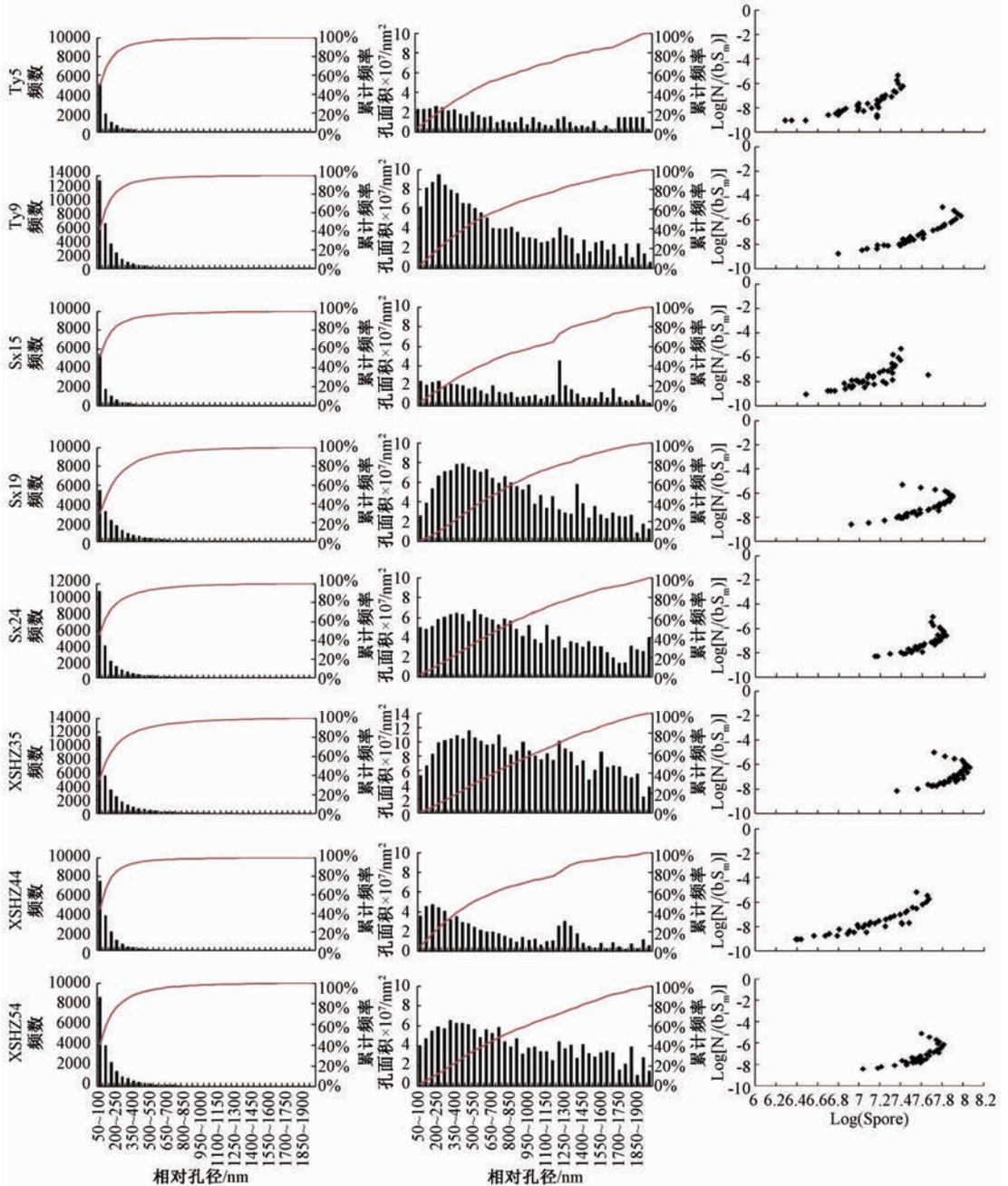


图 3 泥页岩样品不同孔径孔隙的频率、面孔率及相关性

Fig. 3 Frequency, face porosity and correlation of different pore sizes in shale samples

对不同孔径区段 (50 ~ 2000 nm) 的孔隙进行频率、孔面积计算分析发现：不同样品孔隙数量和孔隙总面积相差很大 (见表 2)，TY9 样品孔隙数量最多，数量达到 31623 个，孔面积达到 $259.17 \times 10^7 \text{ nm}^2$ ，面孔率 4.59%；而 TY5 样品孔隙数量最少，仅 10294 个，孔面积仅为 $52.25 \times 10^7 \text{ nm}^2$ ，也是总孔面积最小的，折合面孔率仅 0.92%；样品 XSHZ35 面孔率最大为 5.53%。

总体上看，样品面孔率与总孔数量正相关，面孔率较小的 TY5 和 SX15 样品孔隙总数量也是最小的，分别为 10294 和 10433；而面孔率最大的 XSH35、TY9 两个样品孔隙总数量也是最多的，分别为 31610 和 31623；其它 4 个样品面孔率和孔隙总数量均介于两者之间 (见表 2)。

从孔径分布上，可以看到面孔率低的样品孔径分布不集中，不同孔径区段孔隙的面孔贡献度

表 2 泥页岩样品孔隙特征参数统计表

Table 2 Parametric statistical table of pore characteristics of shale samples

样品编号	孔数量/个	总孔面积 × 10 ⁷ /nm ²	平均孔面积 × 10 ⁴ /nm ²	面孔率/%	D ₁	C ₁	D ₂	C ₂	d _{tran} /nm
TY5	10294	52.25	5.08	0.92	1.9	-21.34	-10.45	71.29	200 ~ 250
TY9	31623	259.17	8.20	4.59	2.65	-27.32	-4.03	26.53	200 ~ 250
SX15	10433	56.16	5.38	0.99	2.93	-28.43	—	—	—
SX19	18404	179.11	9.73	3.17	2.4	-25.62	-1.7	7.3	350 ~ 400
SX24	23850	170.73	7.16	3.02	3.03	-30.41	-7.51	52.46	250 ~ 300
XSHZ35	31610	312.50	9.89	5.53	2.94	-30.33	-3.07	18.72	350 ~ 400
XSHZ44	16811	71.64	4.26	1.27	2.18	-23.3	-4.07	25.61	150 ~ 200
SSHZ54	21267	161.02	7.57	2.85	2.96	-29.78	-5	32.95	250 ~ 300

注: “D” 表示关系函数斜率; “C” 表示关系函数截距; “d_{tran}” 表示过渡点孔径区间; “—” 表示无测试数据

都很小, 而且 50 ~ 200 nm 的小孔径孔隙面孔贡献度相对较高; 而面孔率较高的样品, 一般都有一个孔径区段对面孔贡献度较高, 而这个孔径区段一般大于 200 nm (见图 3)。

Klaver^[19] 对美国 Haynesville 页岩和 Bossier 页岩孔隙大量观察统计发现孔面积与单位面积的孔数量呈现一定的幂律关系。研究中同样对 8 个样品进行了该数据统计, 关系式如公式 (1) 所示:

$$N_i/B_i \cdot S_{\text{mosaic}} = CS_{\text{spore}}^{-D} \quad (1)$$

为了很好地观察孔面积与单位面积孔数量的幂律关系, 将公式 (1) 两边取对数, 得到孔面积与单位面积孔数量的线性关系式 (2)。

$$\log(N_i/B_i \cdot S_{\text{mosaic}}) = -D \cdot \log(S_{\text{spore}}) \pm \log C \quad (2)$$

上述公式 (1) (2) 中, N_i 表示孔隙数量; B_i 表示图像数量; S_{mosaic} 表示图像面积, nm²; D 表示关系函数斜率, 常数; S_{spore} 表示孔隙面积, nm²; C 表示关系函数截距, 常数。

通过对不同孔径区间的孔隙数量及孔隙面积的横向对比, 发现变量孔隙数量指标 log(N_i/B_i · S_{mosaic}) 与孔面积指标 log(S_{spore}) 之间存在两段式线性关系 (见图 3、表 2): 当孔径分布范围较小 (50 ~ 400 nm) 时两者负相关, 孔隙数量指标 log(N_i/B_i · S_{mosaic}) 随孔面积指标 log(S_{spore}) 增加而降低; 而当孔径分布范围较大 (400 ~ 2000 nm) 时两者正相关, 孔隙数量指标 log(N_i/B_i · S_{mosaic}) 随孔面积指标 log(S_{spore}) 增加而增加。两段之间的过渡点分别对应一定的孔径区间 d_{tran}, 不同样品该区间差异较大, 主要集中在 150 ~ 400 nm 之间。

4 孔隙发育控制因素探讨

4.1 矿物组成对孔隙发育的影响因素

利用 JMicroVision 数据分析软件对背散射图像进行灰度识别, 矿物灰度值越高, 在镜下呈现的

颜色越亮。结合微区元素能谱信息及矿物的典型内部结构和接触关系对矿物进行定量分析, 样品的主要矿物组成有石英、长石、方解石、白云石、粘土矿物及少量黄铁矿 (见表 3)。其中粘土矿物含量最多, 脆性矿物 (石英 + 长石)、碳酸盐岩矿物其次, 黄铁矿含量较少。

表 3 泥页岩样品矿物组成

Table 3 Main mineral composition in shale samples

样品编号	脆性矿物/%	碳酸盐岩/%	黄铁矿	粘土矿物
	(石英 + 长石)	(方解石 + 白云石)	/%	/%
TY5	22.32	15.42	10.82	48.44
TY9	35.18	13.03	10.73	49.06
SX15	46.42	10.84	8.36	34.38
SX19	29.78	36.24	1.62	40.36
SX24	33.72	11.15	1.27	53.86
XSHZ35	21.23	8.09	1.04	69.64
XSHZ44	37.36	4.70	1.21	50.73
SSHZ54	32.60	11.22	0.87	55.31

根据统计结果做出不同矿物组合与总面孔率之间的关系图, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出脆性矿物 (石英 + 长石) 与面孔率呈一定的负相关关系 (见图 4a), 伴随有机质生烃过程中所产生的部分有机酸溶液, 以及酸性的地下流体均会溶蚀脆性矿物发育粒内溶蚀孔, 但粒内孔尺度一般较小, 对面孔率的贡献度不高; 碳酸盐岩矿物 (方解石 + 白云石) 对面孔率的影响表现出很弱的负相关关系 (见图 4b), 碳酸盐矿物容易被地层中的有机酸溶液溶蚀而形成粒内溶蚀孔, 且方解石对于甾烷的异构作用有一定的阻滞作用, 从而抑制有机质生烃作用的演化^[19]; 粘土矿物与面孔率呈一定的正相关关系 (见图 4c), 粘土矿物在有机质热演化程度加深的条件下, 会发生矿物相的转变, 随着埋深的逐渐增加, 蒙脱石逐渐向伊利石发生转化, 而蒙脱石比伊利石的比表面积大, 随着蒙脱石向伊利石的转化, 体积减小而产生大量微孔

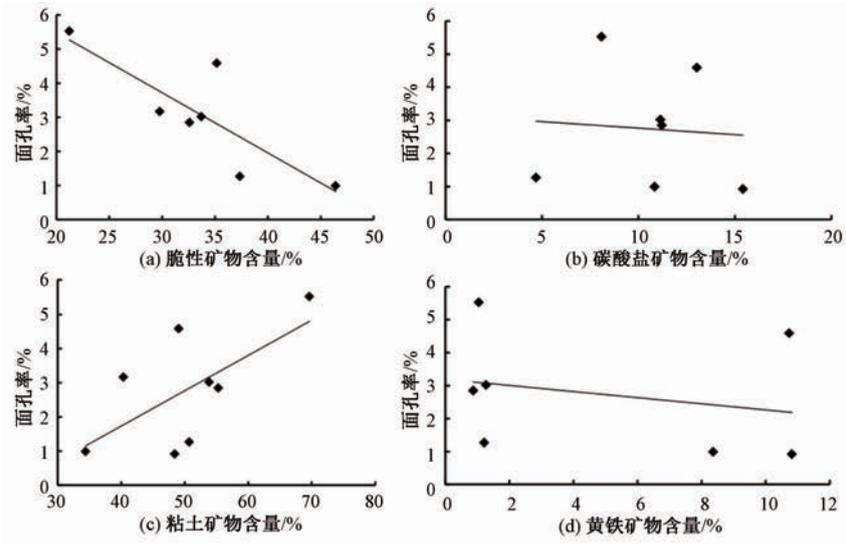


图4 不同矿物与面孔率关系图

Fig. 4 Relationship between different minerals and face porosities

隙^[20-21]；黄铁矿含量与面孔率之间呈现较弱的负相关性（见图4d），一般情况下，黄铁矿含量较高的样品中宏观裂隙比较发育，从而产生黄铁矿含量高而面孔率低的现象。

4.2 有机质含量对孔隙发育的影响因素

泥页岩微观储集空间发育程度与其所含有机碳含量之间存在紧密的联系^[22]，根据图像分析法所统计的面孔率和总有机碳做出散点图，如图5所示，可以看出所选样品TOC含量与孔隙发育程度的相关性并不明显。研究区所选样品中TOC值分布范围差异很大（见表1），介于0.15%~5.34%之间。镜质体反射率（ R_o ）均大于4.2%，最高热解峰温（ T_{max} ）大于435℃占75%，表明研究区已进入成熟—过成熟的演化阶段，这说明在原始富含有机质的泥页岩中已经发生生烃作用，泥页岩中残留的有机质只是生烃之后的残碳。此外，受实验视域和观察尺度的限制，镜下很少观察到有机质孔隙，孔隙面孔率主要是由无机矿物孔所提供。

此外，研究区所选样品的生烃潜量（ $S_1 + S_2$ ）都很低，不超过0.08 mg/g，热演化程度较高，有机质类型均为Ⅲ型（腐殖型）（见表1）。有资料显示^[23]，有机质类型较好、有机质含量较高的太原组暗色泥岩的含气量和生烃潜量远远小于山西组煤岩，而且煤中生烃潜量主要集中在残留烃 S_1 上。较高的生烃潜量来自煤岩吸附作用下的煤层甲烷，而原始含氢量很高的太原组的泥质烃源岩

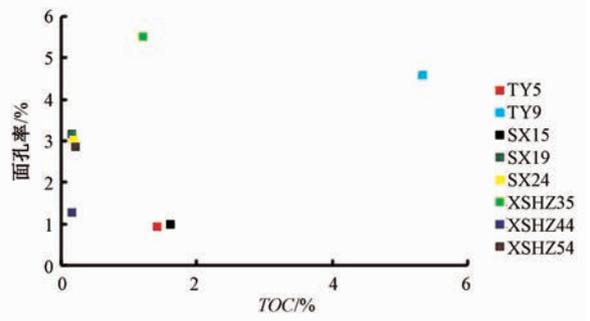


图5 TOC和面孔率关系图

Fig. 5 Relationship between TOC and face porosity

中天然气赋存量却很低，这种现象主要由热演化作用和丰富的孔裂隙系统共同导致。热演化作用主要由地壳热隆升、火成岩接触变质及构造掀斜作用造成的重力滑动等异常变质作用形成^[24]，中生代晚期岩石圈减薄、软流圈上涌导致地热隆升是豫西地区区域热演化程度很高的主要原因^[25]，这个时期也是主要的天然气生成期。由于研究区抬升后埋藏较浅，中生代晚期形成的大量天然气在孔裂隙发育的系统中运移逸散，所以研究区页岩气勘探方向应为埋藏较深的平原覆盖区。

4.3 构造作用对孔隙发育的影响因素

通过对泥页岩样品岩心的观察以及低倍数的电镜扫描，发现样品中的宏观裂隙均十分发育。裂隙的发育主要有两种重要的成因类型，一是构造作用，二是成岩作用。构造成因的裂隙尺度较大，主要为燕山运动、喜山运动两期大规模构造

运动所造成,这些裂隙一般具有明显的方向性。燕山运动时期,受古太平洋板块俯冲欧亚板块以及深部软流圈熔融物质上涌的影响,华北板块先后经历了早期整体抬升和后期裂陷沉降过程,产生了一系列北北东向断裂及伴生断层和各种尺度的裂隙;喜山运动时期,研究区整体进入裂陷和拗陷阶段,又产生大量的张性断层和裂隙。另外,有机质生烃作用、热液增压作用等会导致厚层泥页岩内孔隙流体的增加,当孔隙压力超过岩石破裂极限时会产生一些裂隙并排水排烃,此类裂隙无方向性、比较杂乱无序。

较为发育的裂隙系统增加了岩石的渗流性能,促进了地层水、烃类的交换,使生烃期所产生的有机酸通过构造作用所形成的裂隙进行扩散并对矿物产生溶蚀作用,形成形状较为规则的溶蚀孔。同时,地层之间裂隙的增加会导致地层水的流动,由此不同矿物中易溶组分会随着地层水的流动而被带走,从而形成大量溶蚀孔,所以宏观裂隙的发育在一定程度上会促进微观孔隙的发育。

此外,随着埋藏深度的增加,地层由新到老受到的压实作用逐渐增大,孔隙随埋深的加大会也出现减少的趋势。

5 结论

(1) 南华北盆地偃龙地区 ZK1614 井二叠系泥页岩主要发育的孔隙以无机矿物孔为主,孔隙类型有粒内孔、粒间孔、少量有机质孔及微裂隙。

(2) 研究区二叠系太原组、山西组、石盒子组所选泥页岩样品的面孔率介于 0.92% ~ 5.53% 之间,整体上,面孔率大小与孔隙数量正相关。其中,孔隙数量指标 $\log(N_i/B_i \cdot S_{\text{mosaic}})$ 与孔面积指标 $\log(S_{\text{spore}})$ 成两段式线性关系,当孔径较小时,两者负相关,孔径较大时两者正相关,两段之间的过渡点分别对应一定的孔径区间 d_{tran} ,主要集中在 150 ~ 400 nm 之间。

(3) 不同矿物的力学性质和化学稳定性差异很大,脆性矿物对孔隙的发育有一定的抑制作用;粘土矿物由于矿物相变及脱水作用等发育了大量的孔隙;碳酸盐矿物及黄铁矿与面孔率的相关性不明显,整体呈弱相关的趋势;研究区热演化程度很高,有机质生烃作用导致有机质及其孔隙减少,样品面孔率主要由无机矿物孔提供。

(4) 研究区构造背景复杂,燕山期、喜山期因构造活动形成了大量尺度较大的规则裂隙,有机质生烃及热液增压作用产生了大量不规则裂隙;裂隙的发育使岩层的渗流性能增加,促进了有机酸和地层水对矿物的溶蚀作用,相应的促进了孔隙的发育。且随着埋藏深度的增加,孔隙体积随着压实作用的增大而逐渐减小。

参考文献/References

- [1] 张抗. 从致密油气到页岩油气——中国非常规油气发展之路探析 [J]. 国际石油经济, 2012, 21 (2): 9 ~ 15.
ZHANG Kang. From tight oil & gas to shale oil & gas—An approach to developing unconventional oil & gas in China [J]. International Petroleum Economics, 2012, 21 (2): 9 ~ 15. (in Chinese with English abstract)
- [2] 耳闯, 赵靖舟, 王芮, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质页岩孔隙特征及发育机制 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27 (7): 1202 ~ 1214.
ER Chuang, ZHAO Jingzhou, WANG Rui, et al. Characteristics and occurrence mechanism of organic-rich shale in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (7): 1202 ~ 1214. (in Chinese with English abstract)
- [3] 钟太贤. 中国南方海相页岩孔隙结构特征 [J]. 天然气工业, 2012, 32 (9): 1 ~ 4.
ZHONG Taixian. Characteristics of pore structure of marine shales in South China [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32 (9): 1 ~ 4. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马勇, 钟宁宁, 程礼军, 等. 渝东南两套富有机质页岩的孔隙结构特征——来自 FIB-SEM 的新启示 [J]. 石油实验地质, 2015, 37 (1): 109 ~ 116.
MA Yong, ZHONG Ningning, CHENG Lijun, et al. Pore structure of two organic-rich shales in southeastern Chongqing area: Insight from Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope (FIB-SEM) [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37 (1): 109 ~ 116. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识 [J]. 地质学报, 2014, 88 (7): 1209 ~ 1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factors enrichment for marine shale gas in southern China—Understanding from the Longmaxi formation shale gas in Sichuan basin and its surrounding area [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (7): 1209 ~ 1218. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王红岩, 刘玉章, 董大忠, 等. 中国南方海相页岩气高效开发的科学问题 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (5): 574 ~ 579.
WANG Hongyan, Liu Yuzhang, Dong Dazhong, et al. Scientific issues on effective development of marine shale gas in southern China [J]. Petroleum Exploration and Development,

- 2013, 40 (5): 574 ~ 579. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例 [J]. 中国地质, 2014, 41 (3): 893 ~ 901.
GUO Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi formation of Jiaoshiaba area [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (3): 893 ~ 901. (in Chinese with English abstract)
- [8] 余和中和, 吕福亮, 郭庆新, 等. 华北板块南缘原型沉积盆地类型与构造演化 [J]. 石油实验地质, 2005, 27 (2): 111 ~ 117.
YU Hezhong, L (U) Fuliang, GUO Qingxin, et al. Protosediment basin types and tectonic evolution in the southern edge of north China plate [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27 (2): 111 ~ 117. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张江华. 洛宜—伊川盆地上古生界构造特征及其形成演化 [D]. 西北大学, 2006.
ZHANG Jianghua. Tectonic characterizatics and the formation evolution at the upper paleozoic in Luoyi-Yichuan basin [D]. Northwest University, 2006. (in Chinese)
- [10] 张小浩, 周鼎武, 赵伟波. 豫西地区构造样式与油气勘探的探究 [J]. 西北大学学报自然科学版, 2007, 37 (4): 647 ~ 652.
ZHANG Xiaohao, ZHOU Dingwu, ZHAO Weibo. The structural style and oil and gas exploration prediction in western of Henan Province [J]. *Journal Of Northwest University (Natural Edition)*, 2007, 37 (4): 647 ~ 652. (in Chinese with English abstract)
- [11] 解东宁. 南华北盆地晚古生代以来构造沉积演化与天然气形成条件研究 [D]. 西北大学, 2007.
XIE Dongning. Study of sedimentary evolution and natural gas formation conditions in the late Paleozoic era, southern North China [D]. Northwest University, 2007. (in Chinese)
- [12] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展 [J]. 地球科学进展, 2012, 27 (12): 1319 ~ 1325.
CUI Jingwei, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. New advances in shale porosity research [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27 (12): 1319 ~ 1325. (in Chinese)
- [13] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征 [J]. 石油学报, 2013, 34 (2): 301 ~ 311.
YANG Feng, NING Zhengfu, HU Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34 (2): 301 ~ 311. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吕海刚, 于萍, 闫建萍, 等. 四川盆地志留系龙马溪组泥页岩吸水模拟实验及对孔隙连通性的指示意义 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26 (8): 1556 ~ 1562.
L (U) Haigang, YU Ping, YAN Jianping, et al. Experimental Investigation of Water Absorption and Its Significance on Pore Network Connectivity in Mudstone from Silurian Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26 (8): 1556 ~ 1562. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨向东, 李智锋, 孟洁, 等. 利用分形研究页岩孔隙结构特征 [J]. 石油化工应用, 2013, 32 (5): 20 ~ 22.
YANG Xiangdong, LI Zhifeng, MENG Jie, et al. The characteristics of shale pore structure are studied by fractal [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013, 32 (5): 20 ~ 22. (in Chinese)
- [16] 黄振凯, 陈建平, 王义军, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征 [J]. 石油学报, 2013, 34 (1): 30 ~ 36.
HUANG Zhenkai, CHEN Jianping, WANG Yijun, et al. Characteristics of micropores in mudstones of the Cretaceous Qingshankou formation, Songliao basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 40 (1): 58 ~ 65. (in Chinese with English abstract)
- [17] Loucks R G, Reed R M. . Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *Aapg Bulletin*, 2012, 96 (6): 1071 ~ 1098.
- [18] Klaver J, Desbois G, Littke R, et al. BIB-SEM characterization of pore space morphology and distribution in postmature to overmature samples from the Haynesville and Bossier Shales [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2015, 59 (3): 451 ~ 466.
- [19] 潘长春, 耿安松, 钟宁宁, 等. 矿物和水对于酪根热解生烃作用的影响——Ⅲ. 甾、藿烷 (烯) 的形成与热演化 [J]. 地质学报, 2006, 80 (3): 446 ~ 453.
PAN Changchun, GENG Ansong, ZHONG Ningning, et al. The effects of minerals and water on hydrocarbon generation from kerogen: Ⅲ steranes and triterpane generation and maturayion [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (3): 446 ~ 453. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张琴, 刘畅, 梅啸寒, 等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36 (4): 666 ~ 674.
ZHANG Qin, LIU Chang, MEI Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space [J]. *Oil & Gas Geology [J]*. 2015, 36 (4): 666 ~ 674. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王奕萱, 张晓东, 孙勇, 等. 陕北斜坡上古生界山₂—盒₈段沉积—成岩与储层孔隙特征 [J]. 地质力学学报, 2014, 20 (3): 230 ~ 242.
WANG Yixuan, ZANG Xiaodong, SUN Yong, et al. The porosity characterizatics of sedimentary and diagenetic environment for Shan-2 member to He-8 member at the upper paleozoic in northern Shanxi slope [J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20 (3): 230 ~ 242. (in Chinese with English abstract)
- [22] 熊金红, 梁明亮, 曹占元, 等. 准噶尔盆地南缘柴窝堡凹陷泥页岩地球化学和矿物学特征研究 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (4): 585 ~ 593.
XIONG Jinhong, LIANG Mingliang, CAO Zhanyuan, et al.

- The Geochemical and Mineralogical Characteristics of Shales in Chaiwubu Depression, Southern Margin of Junggar Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23 (4): 585 ~ 593. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴伟, 王雨涵, 曹高社, 等. 南华北盆地豫西地区 C-P 烃源岩地球化学特征 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26 (1): 128 ~ 136.
- WU Wei, WANG Yuhuan, CAO Gaoshe, et al. The Geochemical Characteristics of The Carboniferous and Permian Source Rocks in the Western Henan, the southern North China Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26 (1): 128 ~ 136. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘丽, 任战利. 济源 - 中牟 - 黄口坳陷带热演化史与油气
- 的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28 (3): 355 ~ 361.
- LIU Li, REN Zhanli. Relation between geothermal history and hydrocarbon generation in Jiyuan-Zhongmo-Huangkou depression belt [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28 (3): 355 ~ 361. (in Chinese with English abstract)
- [25] 程喆, 徐旭辉, 王荣新, 等. 南华北地区上古生界烃源岩异常热演化因素探讨 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33 (2): 142 ~ 147.
- CHEN Zhe, XU Xuhui, WANG Rongxin, et al. Reasons for abnormal thermal evolution of source rocks in Upper Paleozoic, southern North China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33 (2): 142 ~ 147. (in Chinese with English abstract)

MICROSCOPIC PORE CHARACTERISTICS AND INFLUENCE FACTORS ANALYSIS OF SHALES IN PERMIAN, YANLONG AREA, SOUTHERN NORTH CHINA BASIN

CHEN Jing, WU Wei, WANG Juan, HUANG Xuefeng

(*Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China*)

Abstract: Using argon ion polishing and field emission environmental scanning electron microscopy imaging testing technique, the interactive marine-continental facies and continental facies shale samples from Permian drilled in ZK1614 well in Yanlong area of southern North China Basin are scanned, and the SE and BSE information are obtained as well. Combining X-ray spectrum information with gray level recognition function of JMicroVision software, qualitative analysis and quantitative representation of the mineral composition and the characteristics of micro pores of shale samples are made, and the genesis of pore system are discussed. The research shows that the pores of shale samples are mainly inorganic mineral pores, and the pore types include intragranular pores, intergranular pores, and a small amount of organic matter pores and micro fissures. The surface porosities of samples from Permian are between 0.92% ~ 5.53%, and surface porosities are positively correlated with the number of pores in general. With different sizes of pores, there is a two-segment linear relationship between the logarithmic index of pore area and the logarithmic index of pore number of unit area in different pore diameter interval between 50 ~ 2000 nm, and when the pore diameter is small, they are negatively correlated, when the pore diameter is large, they are positively correlated. Different minerals result in different control effects on the development of pores. Brittle minerals mainly influence the development of micro fissures and inhibit the development of pores; clay minerals, due to the actions of tectonic stress, phase transformation and dehydration of minerals, result in plenty of pores, which promote the development of pores. Besides, the differential expansion and differential dissolution of minerals could also produce pores. During the Yanshan and the Himalayan periods, large scale fractures were formed in the study area. The development of fractures increased the penetrability of the rock stratum, which promoted the dissolution of minerals by organic acids and formation water, and it also promoted the development of pores correspondingly. Moreover, with the increase of burial depth, the pore volume decreased with the increase of compaction.

Key words: southern North China Basin; Permian; shale; microscopic pore