

·油气地质·

## 氮气吸附法—压汞法分析页岩孔隙、 分形特征及其影响因素

曹涛涛<sup>1,2</sup>, 宋之光<sup>3</sup>, 刘光祥<sup>1</sup>, 尹琴<sup>4</sup>, 罗厚勇<sup>1</sup>

(1.南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 2.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; 3.中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4.中国石化河南油田分公司 勘探开发研究院, 河南 郑州 450016)

**摘要:**利用氮气吸附法和压汞法联合表征下扬子皖南地区二叠系页岩的孔隙分布、孔隙度及分形特征。结果表明,研究区二叠系页岩中发育的孔隙以微孔和大孔为主,其中微孔的体积占页岩总孔隙体积的33.63%~81.08%,平均为56.45%;联孔孔隙度明显高于压汞孔隙度,平均增加96.06%;页岩在微孔和过渡孔—大孔区间均具有明显的分形特征,且微孔的分形维数比过渡孔—大孔更加分散,说明页岩中微孔的非均质性和复杂程度要高于过渡孔—大孔;微孔的孔隙度和分形维数与总有机碳含量、比表面积和生烃潜量呈正相关关系,与石英含量呈负相关关系;过渡孔—大孔的孔隙度和分形维数与总有机碳含量、石英含量呈负相关性,与比表面积和粘土矿物含量之间没有明显的相关性。随着埋深的增加,微孔的孔隙度和分形维数变化较小,过渡孔—大孔的孔隙度和分形维数明显降低,且分形维数对埋深的敏感性高于孔隙度。

**关键词:**二叠系 页岩 联孔分布 分形维数 氮气吸附法 压汞法 皖南地区

中图分类号:TE112.23

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)02-0001-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.20151215.002

## Characteristics of shale pores, fractal dimension and their controlling factors determined by nitrogen adsorption and mercury injection methods

Cao Taotao<sup>1,2</sup>, Song Zhiguang<sup>3</sup>, Liu Guangxiang<sup>1</sup>, Yin Qin<sup>4</sup>, Luo Houyong<sup>1</sup>

(1.School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing City, Jiangsu Province, 210093, China; 2.Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi City, Jiangsu Province, 214126, China; 3.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou City, Guangdong Province, 510640, China; 4.Research Institute of Exploration and Production, Henan Oilfield Company, SINOPEC, Zhengzhou City, Henan Province, 450016, China)

**Abstract:** Nitrogen adsorption method and mercury injection experiment were applied to characterize the joint pore distribution, porosity and fractal characteristics of Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region. The results illustrate that: the pores in the Permian shales are dominated by micropore and macropore, and the volume of micropore accounts for 33.63% to 81.08% of the total pore volume with an average of 56.45%; the joint porosity is significantly higher than the porosity obtained by mercury injection method with an average increase of 96.06%; both the micropore and transition pore to macropore could generate obvious fractal characters for the Permian shales, and the fractal dimensions of the micropores are more dispersed than those of the transition pores to macropores, which indicates that the degree of het-

收稿日期:2015-12-11。

作者简介:曹涛涛(1987—),男,河南柘城人,工程师,博士,从事非常规油气地质方面的研究。联系电话:15861496187, E-mail:515165359@163.com。

基金项目:国家“973”计划“深层页岩气储集物性及含气性研究”(2012CB214704),国家自然科学基金项目“我国南方古生界高过成熟页岩吸附特征与页岩含气性评价”(41273058),国家科技重大专项“深层高成熟烃源岩的容烃与排烃评价”(2011ZX05008-002-20)。

erogeneity and complexity of the micropore are higher than that of the transition pore to macropore; the porosity and fractal dimension of the micropore have positive correlation with *TOC*, specific surface area and hydrocarbon generation potential but negative correlation with quartz content; while the porosity and fractal dimension of the transition pore to macropore have negative correlation with *TOC* and quartz content, and no correlations with clay mineral content and specific surface area. With the increase of buried depth, the porosity and fractal dimension have no obvious variations for the micropore, but a certain decrease for the transition pore to macropore. The fractal dimension is more sensitive than the porosity to the buried depth.

**Key words:** Permian; shales; joint pore distribution; fractal dimension; nitrogen adsorption method; mercury injection experiment; south Anhui Province

孔隙特征是页岩储集物性最重要的研究内容之一,影响页岩中油气的聚集、流动及产出,是评价页岩油气资源潜力的关键参数之一<sup>[1-3]</sup>。通常用来表征非常规致密储层孔隙特征的方法有氮气吸附法、压汞法、聚焦离子束扫描电子显微镜和核磁共振等,但不同方法获得的孔隙范围各有差异,仅利用单一方法不能全面表征页岩的孔隙特征,须利用多种方法进行联合测定<sup>[4-5]</sup>。例如氮气吸附法主要测定的是孔径小于100 nm的孔隙<sup>[6]</sup>;压汞法测定的孔隙的孔径为3 nm~120 μm,但对纳米级孔隙的测定并不全面、准确,压汞法测定的孔隙度远低于页岩的实际孔隙度<sup>[7]</sup>。联合氮气吸附法与压汞法是全面、定量表征页岩孔隙特征的有效方法<sup>[8-9]</sup>,但在这2种方法联合分析过程中采用何种孔隙模型对孔隙进行连接、在何处进行连接以及孔隙度如何计算等则是联合分析页岩孔隙特征需要解决的关键问题。

基于氮气吸附法和压汞法表征的孔隙特征,可以运用分形理论进行数字化储集岩孔隙的复杂程度和非均质性;且分形维数越大,表明储集岩的孔隙空间结构越复杂<sup>[10-12]</sup>。通常用来计算分形维数的模型有FHH模型、Menger海绵模型、BET模型和热力学方法等<sup>[13]</sup>,虽然不同模型计算得到的分形维数没有直接的对比性,但不同页岩采用同一模型计算得到的分形维数却能很好地反映页岩孔隙结构的差异,便于直接对比页岩储层孔隙的复杂程度以及研究不同孔隙的成因等。目前中外学者已经对页岩的分形维数进行了研究<sup>[10-12,14-17]</sup>,主要是分析页岩中部分孔隙的分形维数特征及其影响因素,但对全孔的分形特征及分形所表征的地质意义的研究尚欠深入。为此,笔者采用氮气吸附法和压汞法对下扬子皖南地区二叠系页岩的孔隙特征进行联合表征并重新计算页岩的孔隙度,在此基础上进一步研究不同孔隙的分形特征,综合页岩的有机地球化学及矿物组成特征,研究影响孔隙发育及分形维数的因素,进而探讨分形维数所表征的意义及随埋深的演化规律,以期认识页岩的孔隙特征、成因

及演化过程提供新的研究思路。

## 1 页岩样品特征、测量仪器及方法

### 1.1 页岩样品特征

页岩样品采自下扬子皖南地区昌参1井二叠系,通过有机碳含量测定、高温热解色谱分析以及矿物成分分析,获得页岩样品的有机地球化学参数和矿物组成特征。研究区二叠系页岩样品的总有机碳含量(*TOC*)为0.12%~12.2%,平均为4.97%;最高热解峰温( $T_{max}$ )为492~561 ℃,表明页岩已进入高一过成熟阶段;生烃潜量( $S_1+S_2$ )为0.1~3.71 mg/g,平均为1.56 mg/g,反映该套页岩已基本没有生烃潜力。

研究区二叠系页岩样品的矿物成分以石英、伊利石和蒙脱石为主。其中,石英含量为18.2%~72.1%,平均为29.50%;伊利石含量为0~43.6%,多数大于25.1%;蒙脱石含量为0~29.7%。大多数页岩样品具有一定含量的长石、绿泥石和黄铁矿等,个别页岩样品的白云石和高岭石含量很高。

### 1.2 测量仪器及方法

页岩的孔隙结构和类型均很复杂,其孔径分布范围从纳米级到毫米级。鉴于中外学者对于页岩孔隙的划分尚未形成统一标准<sup>[18]</sup>,为便于对页岩的孔隙分布特征及影响因素进行研究,笔者采用Xoatb十进制孔隙分类标准<sup>[19]</sup>,将孔隙分为大孔(孔径大于1 000 nm)、中孔(孔径为100~1 000 nm)、过渡孔(孔径为10~100 nm)以及微孔(孔径小于10 nm)。为全面表征页岩孔隙,有效地进行孔隙连接并计算联孔孔隙度(微孔孔隙度与过渡孔一大孔孔隙度之和称为联孔孔隙度),对过渡孔一大孔的孔隙体积和孔径分布采用压汞法获得,微孔的孔隙体积和孔径分布采用氮气吸附法获得。

页岩样品的压汞孔隙度及孔径分布由美国麦克公司生产的Micromeritics Autopore9510孔隙仪测定。取3~5 g粉碎至1~20目的页岩样品,在温度

为 110 °C 条件下真空干燥 12 h, 然后放入仪器中进行测试。根据 Washburn 公式<sup>[20]</sup>计算得到页岩样品的孔径。

根据氮气在低温低压(-196 °C和 127 kPa)条件下的超临界性质, 利用美国麦克公司生产的 ASAP2020 比表面积与孔径分析仪测定页岩样品的比表面积及孔径分布特征。取 1~2 g 粉碎至 100 目的页岩样品, 在温度为 110 °C 条件下真空干燥 12 h, 脱去页岩中的水分和挥发性气体后, 放入仪器进行分析。采用 Brunaur-Emmett-Teller(BET)多点分析法<sup>[21]</sup>得到页岩样品的比表面积, 采用密度泛函理论(DFT法)<sup>[22]</sup>获得孔隙体积及孔径分布。

## 2 页岩联孔分布特征

研究表明, 下扬子皖南地区二叠系页岩的比表面积分布范围较宽, 为 1.05~21.86 m<sup>2</sup>/g, 平均为 11.80 m<sup>2</sup>/g; 压汞孔隙度为 1.18%~6.58%, 平均为 3.22%; 反映出研究区不同页岩的孔隙结构差异很大, 具有明显的孔隙非均质性。

利用氮气吸附法测得的 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 孔隙分布与压汞法得到的孔隙分布多是在孔径为 50 nm 处进行连接, 但效果并不理想<sup>[23]</sup>, 不能有效地表征页岩整体的孔隙结构特征。鉴于笔者采用的是十进制孔隙分类标准, 因此将微孔和过渡孔一大孔在孔径为 10 nm 处进行连接。结果(图 1)表明, 孔隙的连接效果非常好, 可以将微孔和过渡孔紧密连接, 因此, 联合氮气吸附法和压汞法可以有效而准确地表征页岩的孔隙分布特征。

研究区二叠系页岩的孔隙结构较为复杂, 所有页岩样品在微孔和大孔区间均出现明显的孔隙峰值(图 1), 仅有少数样品(如 CC-76)在过渡孔和中孔区间也显示出较高的孔隙体积, 这种多类型孔隙均较发育的页岩的孔隙度最高(表 1)。研究区二叠系页岩样品的孔径分布特征表现为所有页岩样品在孔径为 1.48 nm, 4.15 nm 和 60.49 μm 时均出现峰值(图 1), 其他孔径的孔隙体积相对较小(个别样品除外); 反映出研究区二叠系页岩主要发育微孔和大孔, 中孔和过渡孔相对较少, 且对页岩总孔隙度的贡献也较小。

由下扬子皖南地区二叠系页岩不同孔径的孔隙体积占总孔隙体积的比例可以看出, 随着孔径的增大, 页岩中微孔体积迅速增加, 可占页岩总孔隙体积的 33.63%~81.08%, 平均为 56.45%, 而过渡孔一大孔的孔隙体积占总孔隙体积的比例相对较

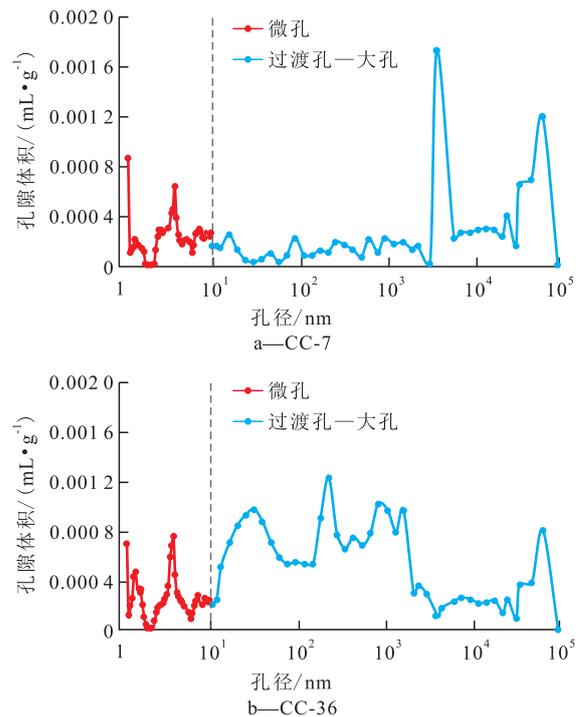


图 1 下扬子皖南地区二叠系页岩联孔分布特征

Fig.1 Joint pore size distributions for Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

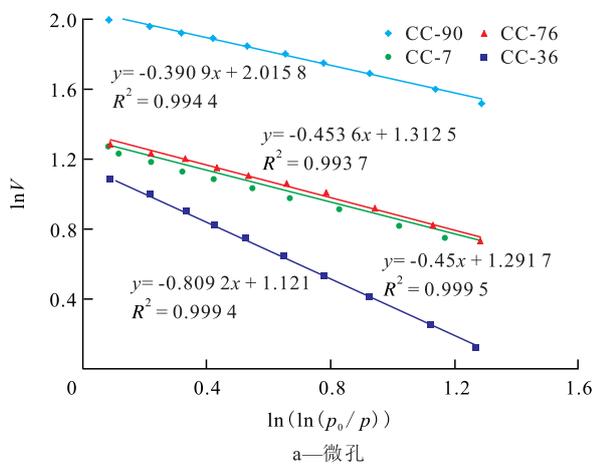
表 1 下扬子皖南地区二叠系页岩的微孔和过渡孔一大孔孔隙度及其分形维数

Table 1 Porosity and fractal dimension of the micropore, transition pore to macropore of Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

样品编号	埋深/m	联孔孔隙度, %	孔隙度, %		分形维数	
			微孔	过渡孔一大孔	微孔	过渡孔一大孔
CC-7	90.7	5.26	2.73	2.53	2.55	2.79
CC-12	121.7	7.22	3.02	4.2	2.56	2.95
CC-13	123.4	5.76	3.98	1.78	2.56	2.89
CC-14	128.1	6.50	3.45	3.05	2.41	2.88
CC-15	131.2	4.43	1.66	2.77	2.31	2.87
CC-16	132.9	6.51	4.55	1.96	2.54	2.86
CC-20	145.9	7.89	5.08	2.81	2.57	2.95
CC-21	152.7	6.26	3.35	2.91	2.61	2.59
CC-29	187.4	5.68	2.90	2.78	2.48	2.90
CC-36	208.9	4.65	3.10	1.55	2.19	2.98
CC-48	239.6	5.27	2.39	2.88	2.32	2.82
CC-76	305.9	9.10	3.06	6.04	2.55	3.15
CC-77	308.5	3.43	2.14	1.29	2.28	2.56
CC-78	312.4	5.20	2.95	2.25	2.50	2.89
CC-79	314.7	7.35	3.85	3.5	2.54	2.89
CC-80	317.5	4.34	3.19	1.15	2.27	2.74
CC-82	321.5	4.42	2.22	2.2	2.24	2.58
CC-85	330	4.10	2.39	1.71	2.16	2.89
CC-90	341.8	6.66	5.40	1.26	2.61	2.86

低(表1)。研究表明,致密性页岩的孔隙主要以孔径小于10 nm的微孔为主,与前人研究认为的页岩中纳米级孔隙可以占到页岩总孔隙体积的50%~80%一致<sup>[24]</sup>;也反映出压汞法对微孔的测试结果偏低,导致对页岩中微孔体积占总孔隙体积的比例以及页岩实际孔隙度的计算结果偏低。

研究区二叠系页岩的联孔孔隙度为3.43%~9.10%,与压汞孔隙度相比,联孔孔隙度增加32.24%~267.80%,平均增加96.06%(表1)。因此,若不进行联孔孔隙度分析,仅根据压汞法得到的微孔孔隙度将远低于实际的微孔孔隙度,特别是孔径小于3 nm的孔隙体积未计算在内。



$V$ ——相对压力下的氮气吸附量,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $p_0$ ——气体饱和和蒸汽压力, Pa;  $p$ ——氮气吸附试验中的氮气压力, Pa;  
 $V_p$ ——压汞测得的孔隙体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $P$ ——进汞压力, MPa

图2 下扬子皖南地区二叠系页岩微孔和过渡孔一大孔的分形维数计算结果

Fig.2 Calculated results of fractal dimension of micropore and transition pore to macropore of Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

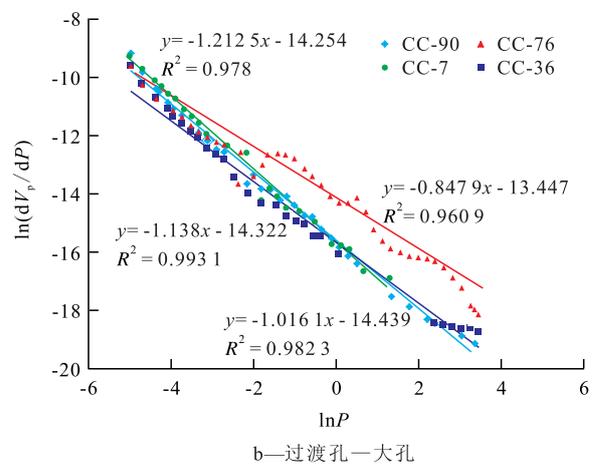
算结果的可靠性和适用性。但不同页岩的分形维数具有一定差异,例如样品CC-76过渡孔一大孔的分形维数的相关系数相对较小,其分形维数较其他样品的分形维数有较大偏差。

从表1可以看出,研究区二叠系页岩的微孔分形维数为2.16~2.61,且较为分散,说明页岩中微孔分布特征比较复杂,与微孔的孔径较小和数量较多密切相关,也反映出微孔更易造成孔隙发育的非均质性。过渡孔一大孔的分形维数为2.58~3.15,主要集中于2.86~2.95,表明除个别样品(如CC-76)具有比较复杂的孔隙结构外,其他样品的孔隙分布具有很好的相似性。研究区二叠系页岩微孔分布较过渡孔一大孔更分散,变化更明显,表明有机质含量对微孔的影响很大,更易造成微孔发育的非均质性;对于过渡孔一大孔,尽管少量页岩样品的孔隙分布比较复杂,但整体具有以大孔为主、过渡孔和中孔为辅的特点。

### 3 页岩孔隙分形特征

对于不同测试方法测得的页岩孔隙进行分形维数表征时,须采用不同的分形维数模型。采用FHH模型和Menger海绵模型分别对下扬子皖南地区二叠系页岩的微孔和过渡孔一大孔的分形特征进行表征<sup>[25-26]</sup>。

研究区二叠系页岩的微孔和过渡孔一大孔的分形维数计算结果(图2)显示,微孔分形维数计算的相关性较好,相关系数在0.99以上,过渡孔一大孔分形维数计算的相关系数均在0.96以上,表明计



### 4 页岩孔隙度及分形维数影响因素

#### 4.1 孔隙度影响因素

下扬子皖南地区二叠系页岩微孔和过渡孔一大孔孔隙度影响因素(图3)的分析结果表明,其微孔孔隙度随着TOC的增加而增加,但TOC值很高(大于10%)的页岩样品则具有较低的孔隙度(图3a),究其原因可能为高含量有机质会导致页岩结构更易被压实,造成TOC值很高的页岩孔隙发育却较差。同时随着 $S_1+S_2$ 的增加,页岩的微孔孔隙度明显增加(图3b),这可能是TOC与 $S_1+S_2$ 之间存在正相关性的结果。但是随着TOC和 $S_1+S_2$ 的增加,过渡孔一大孔孔隙度呈下降趋势(图3a,图3b),表明页岩TOC和 $S_1+S_2$ 的增加不利于过渡孔一大孔的发育,其原因为有机质含量的增加会在页岩中占据更多的体积,进而充填于页岩的基质孔隙和微裂缝中。因

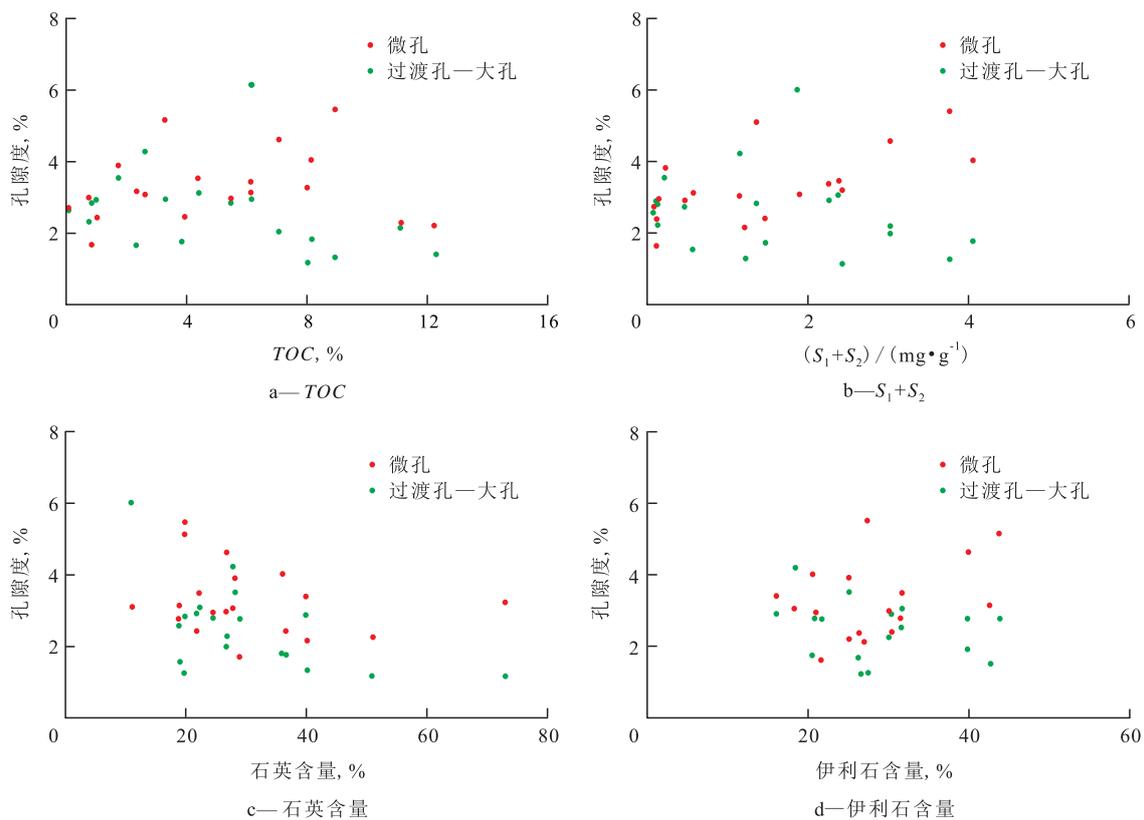


图3 下扬子皖南地区二叠系页岩微孔和过渡孔—大孔孔隙度影响因素

Fig.3 Controlling factors of porosities of micropore and transition pore to macropore of Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

此,页岩有机质中主要发育微孔,致使页岩具有较高的比表面积和大量的微孔体积,进而有利于页岩中吸附气的储存<sup>[27]</sup>。

随着石英含量的增加,页岩的微孔和过渡孔—大孔孔隙度均呈明显下降趋势(图3c),表明研究区二叠系页岩中石英含量的增加未引起脆性矿物微裂缝的增加,不利于页岩孔隙度的增加。此外,分析石英含量增加对页岩中基质矿物孔隙发育的影响发现,一方面石英本身很少发育粒内孔隙,对页岩孔隙度的贡献较小;另一方面,石英含量增加导致粘土矿物等含量降低,造成粘土矿物对页岩孔隙度的贡献减小。随着伊利石含量的增加,微孔孔隙度呈微弱增加的趋势(图3d),表明伊利石等粘土矿物会增加一定的微孔孔隙度;过渡孔—大孔孔隙度随着伊利石含量增加呈明显降低的趋势,表明粘土矿物虽然会发育一定量的微孔,但发育的过渡孔—大孔较少。因此,无论是脆性矿物还是粘土矿物含量的增加均不利于研究区二叠系页岩过渡孔—大孔的发育,也进一步确定其页岩具有基质矿物孔隙或微裂缝不发育、整体以有机质微孔为主的特征。

#### 4.2 分形维数影响因素

下扬子皖南地区二叠系页岩微孔和过渡孔—

大孔分形维数影响因素(图4)的分析结果表明,其微孔的分形维数主要与TOC、比表面积等呈正相关性(图4a,图4b),表明TOC值越高,有机质微孔越多,比表面积和微孔孔隙度增加,孔隙结构复杂,微孔的分形维数也就越高<sup>[25]</sup>。随着TOC的增加,过渡孔—大孔的分形维数表现为先轻微增加后降低的趋势(图4a),表明TOC增加导致页岩中过渡孔—大孔的孔隙非均质性具有一定的复杂性,这与TOC对页岩中过渡孔—大孔孔隙度的影响有关。当TOC较低时,页岩组构受压实作用影响较弱,基质矿物孔隙被有机质充填较少,孔隙发育较好,孔隙结构比较复杂,分形维数较高;TOC较高时,一方面有机质会充填矿物孔隙空间,降低基质矿物孔隙度,另一方面页岩组构更易受压实作用影响,导致矿物孔隙度降低。随着比表面积的增加,过渡孔—大孔的分形维数变化较小(图4b),表明过渡孔—大孔不是页岩比表面积的主要贡献者。

随着石英含量的增加,微孔和过渡孔—大孔的分形维数均呈明显降低的趋势(图4c),表明石英含量的增加不利于微孔以及过渡孔—大孔的发育,其孔隙的非均匀性和孔隙结构的复杂程度均减弱,这与张陈珺等<sup>[28]</sup>分析的随着石英含量增加,四川志留

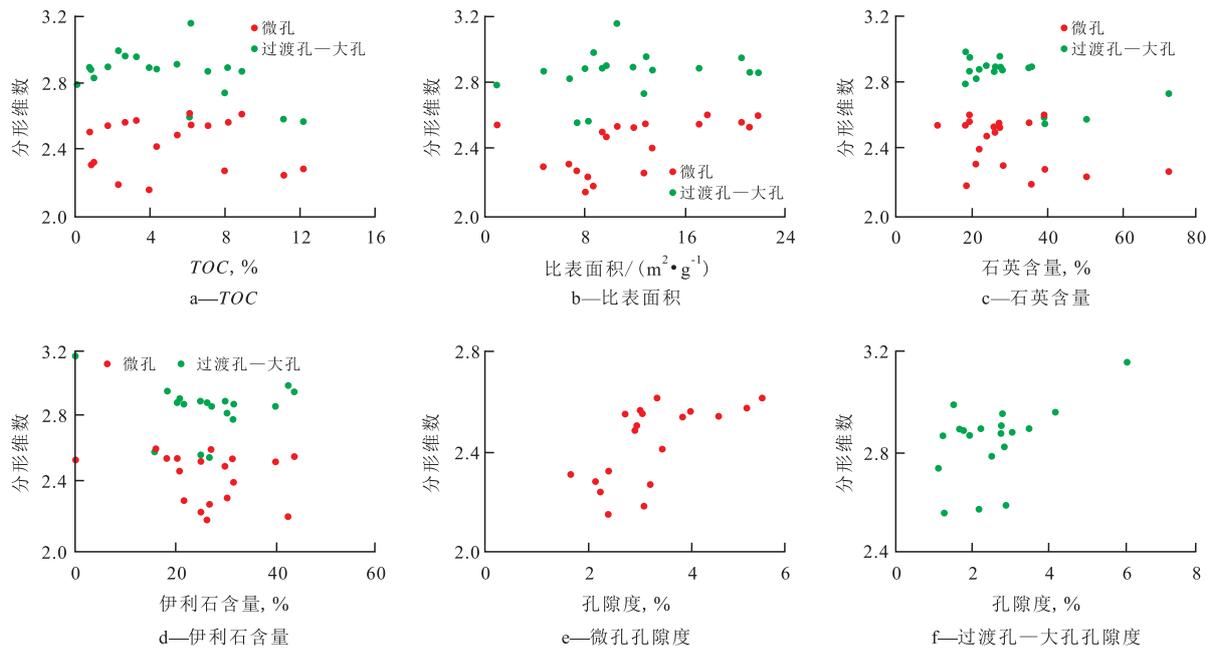


图4 下扬子皖南地区二叠系页岩微孔和过渡孔一大孔分形维数影响因素

Fig.4 Controlling factors of fractal dimension of micropore and transition pore to macropore of Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

系龙马溪组页岩大孔阶段孔隙分形维数增大的情况不同,其原因可能为研究区二叠系页岩中石英的微裂缝发育程度较差,而龙马溪组页岩中脆性矿物微裂缝较为发育。随着伊利石含量的增加,微孔和过渡孔一大孔的分形维数均未发生明显变化(图4d),反映出伊利石本身发育的孔隙较少,对页岩孔隙的分布和非均质性影响较小。矿物成分对页岩孔隙分形维数的影响可能与研究区二叠系页岩经历了成岩演化以及强烈的压实作用有关,粘土矿物层间孔、残留原生孔在应力作用下被压实、破坏,仅有少量的矿物粒内孔对孔隙的非均质性和分形维数产生一定影响<sup>[25]</sup>。

研究区二叠系页岩的微孔和过渡孔一大孔的分形维数分别与其孔隙度呈较好的正相关性(图4e,图4f),表明孔隙度越高,孔隙结构越复杂,分形维数越大。利用分形维数可以很好地表征孔隙的发育程度以及孔隙分布的非均质性,也反映出分形维数在很大程度上受页岩孔隙度控制,与孔隙度发育的影响因素密切相关。特别是在表征页岩储层孔隙特征时,分形维数可以直观地反映出同一层位不同页岩孔隙结构的复杂程度、非均质性乃至孔隙的演化规律。

### 5 页岩孔隙分形的地质意义

页岩孔隙具有二重或多重分形特征,分别对应

微孔和过渡孔一大孔阶段的孔隙特征。微孔和过渡孔一大孔分别来自有机质热解排烃生成的有机孔和基质矿物孔隙、微裂缝,可以通过微孔的分形维数来分析页岩中有机质孔隙的发育程度以及分布的差异性,为研究有机质孔隙发育程度及影响因素、对吸附气的储集能力等提供新的研究方法。通过过渡孔一大孔的分形维数与矿物成分的关系,可以判识页岩中矿物的孔隙及微裂缝的发育情况;如石英含量与分形维数之间呈正相关性,表明微裂缝较为发育<sup>[28]</sup>,反之则表明脆性矿物中的微裂缝不发育或被方解石和沥青充填等。

随着埋深的增加,下扬子皖南地区二叠系页岩微孔孔隙度和分形维数基本未发生明显变化(图5a,图5b),表明随着埋深的增加,微孔结构的复杂程度未受到明显的影响,也反映出已进入高一过成熟阶段的页岩的有机质孔隙不易受压实作用影响。但随着埋深的增加,页岩的过渡孔一大孔的孔隙度呈降低趋势(图5c),表明页岩在压实过程中导致矿物孔隙空间减少;与之对应的分形维数则显示出更强烈的下降趋势以及个别样品的分形维数具有较大的离散性(图5d),表明以矿物孔隙为主的过渡孔一大孔的分形维数更易受压实作用影响,对埋深和压实作用的敏感性要高于过渡孔一大孔孔隙度对埋深的敏感性,这为今后利用分形维数特征研究页岩矿物孔隙度、有机质孔隙随埋深的演化过程提供了很好的研究思路。

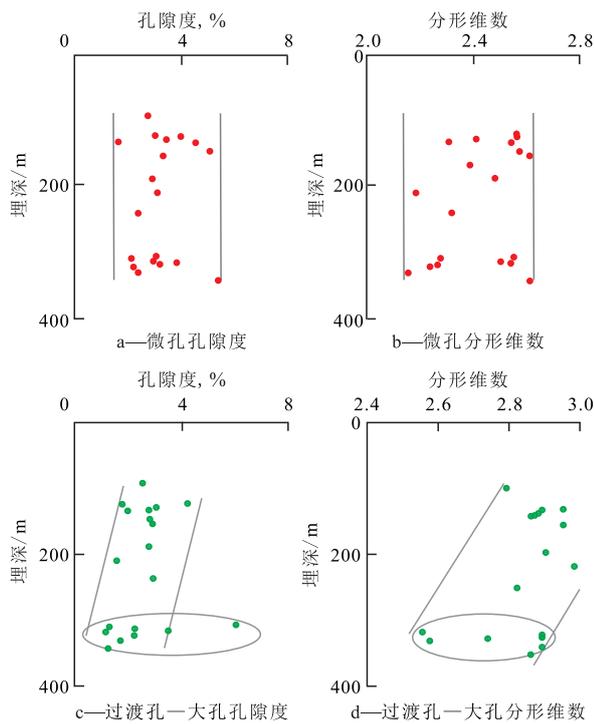


图5 下扬子皖南地区二叠系页岩微孔、过渡孔—大孔的孔隙度和分形维数随埋深的变化

Fig.5 Variations of porosities and fractal dimensions of micropore and transition pore to macropore with buried depth for Permian shales in south Anhui Province, the Lower Yangtze region

## 6 结论

联合氮气吸附法和压汞法研究下扬子皖南地区二叠系页岩的孔隙及分形特征。结果表明,将氮气吸附法测得的微孔与压汞法测得的过渡孔—大孔进行有效连接,是全面表征页岩微观孔隙特征的有效方法。研究区二叠系页岩的联孔分布特征表现为,以发育微孔和大孔为主,其中微孔体积占总孔隙体积的33.63%~81.08%;且联孔孔隙度远高于压汞孔隙度,平均增加96.06%。研究区二叠系页岩中的微孔主要以有机质孔隙为主,微孔的孔隙度和分形维数与 $TOC$ 和 $S_1+S_2$ 呈正相关性;过渡孔—大孔不发育,可能与有机质充填基质矿物孔隙导致孔隙减少以及微裂缝不发育有关,其分形维数与 $TOC$ 和石英含量呈负相关性。不同阶段的孔隙分形维数与孔隙度具有很好的正相关关系。随着埋深的增加,研究区二叠系页岩微孔孔隙度和分形维数基本未发生明显变化,表明已进入高一过成熟阶段的页岩的有机质孔隙不易受压实作用影响;过渡孔—大孔孔隙度和分形维数呈降低趋势,表明页岩被埋藏压实后导致矿物孔隙空间减少。分形维数对埋深

的敏感性高于孔隙度对埋深的敏感性,为今后研究实际地层条件下孔隙演化规律及其影响因素提供了新的研究思路。

### 参考文献:

[1] 赵可英,郭少斌.海陆过渡相页岩气储层孔隙特征及主控因素分析——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].石油实验地质,2015,37(2):141-149.  
Zhao Keying, Guo Shaobin.Characteristics and main controlling factors of shale gas reservoirs in transitional facies: A case study of Upper Paleozoic in Ordos Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(2):141-149.

[2] 李建青,高玉巧,花彩霞,等.北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J].油气地质与采收率,2014,21(4):23-27,32.  
Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al.Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(4):23-27,32.

[3] 王勇,宋国奇,刘惠民,等.济阳拗陷页岩油富集主控因素[J].油气地质与采收率,2015,22(4):20-25.  
Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al.Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(4):20-25.

[4] 曹涛涛, Song Zhiguang, Wang Sibao, et al.Characterizing the pore structure in the Silurian and Permian shales of the Sichuan Basin, China [J].Marine and Petroleum Geology, 2015, 61 (3) : 140-150.

[5] 罗少成,成志刚,林伟川,等.基于核磁共振测井的致密砂岩储层孔喉空间有效性定量评价[J].油气地质与采收率,2015,22(3):16-21.  
Luo Shaocheng, Cheng Zhigang, Lin Weichuan, et al.Quantitative evaluation of the effectiveness of pore-throat space in tight sandstone reservoirs based on nuclear magnetic resonance log [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(3):16-21.

[6] Kuila U, Prasad M.Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales [J].Geophysical Prospecting, 2013, 61 (2):341-362.

[7] Bolton A J, Maltman A J, Fisher Q.Anisotropic permeability and bimodal pore-size distributions of fine-grained marine sediments [J].Marine and Petroleum Geology,2000,17(6):657-672.

[8] 田华,张水昌,柳少波,等.压汞法和气体吸附法研究富含有机质页岩孔隙特征[J].石油学报,2012,33(3):419-427.  
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al.Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(3):419-427.

[9] 杨峰,宁正福,孔德涛,等.高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J].天然气地球科学,2013,24(3):450-455.  
Yang Feng, Ning Zhengfu, Kong Detao, et al.Pore structure of shales from high pressure mercury injection and nitrogen adsorption method [J].Natural Gas Geoscience,2013,24(3):450-455.

[10] 李留仁,赵艳艳,李忠兴,等.多孔介质微观孔隙结构分形特征

- 及分形系数的意义[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):105-107.
- Li Liuren, Zhao Yanyan, Li Zhongxing, et al. Fractal characteristics of micropore structure of porous media and the meaning of fractal coefficient [J]. Journal of University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(3): 105-107.
- [11] 杨宇, 孙晗森, 彭小东, 等. 煤层气储层孔隙结构分形特征定量研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 31-33, 88.
- Yang Yu, Sun Hansen, Peng Xiaodong, et al. Quantitative study on fractal characteristics of the structure of CBM reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 31-33, 88.
- [12] 杨峰, 宁正福, 王庆, 等. 页岩纳米孔隙分形特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 618-623.
- Yang Feng, Ning Zhengfu, Wang Qing, et al. Fractal characteristics of nanopore in shales [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 618-623.
- [13] 李子文, 林柏泉, 郝志勇, 等. 煤体多孔介质孔隙度的分形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 437-442, 448.
- Li Ziwen, Lin Baiquan, Hao Zhiyong, et al. Fractal characteristics of porosity for porous media in coal mass [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 437-442, 448.
- [14] Bu H L, Ju Y W, Tan J Q, et al. Fractal characteristics of pores in non-marine shales from the Huainan coalfield, eastern China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 66-177.
- [15] Liu X J, Xiong J, Liang L X. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic-rich Yanchang formation shale in central China by nitrogen adsorption/desorption analysis [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 62-72.
- [16] Lai J, Wang G W. Fractal analysis of tight gas sandstone using high-pressure mercury intrusion techniques [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 185-196.
- [17] Yang F, Ning Z F, Liu H Q, et al. Fractal characteristics of shales from a shale gas reservoir in the Sichuan Basin, China [J]. Fuel, 2014, 115: 378-384.
- [18] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and descriptive classification for matrix-related mudrocks pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1 071-1 098.
- [19] 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出 [M]. 宋士钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- Hodot B B. Coal and gas outburst [M]. Song Shizhao, Wang Youan, trans. Beijing: Chinese Industry Press, 1966.
- [20] Washburn E W. Note on the method of determining the distribution of pore sizes in a porous material [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1921, 7(4): 115-116.
- [21] Brunauer S, Emmet P H, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers [J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.
- [22] Thierfelder C, Witte M S, Blankenburg S, et al. Methane adsorption on graphene from first principles including dispersion interaction [J]. Surface Science, 2011, 605(7/8): 746-749.
- [23] Labani M M, Rezaee R, Saeeedi A, et al. Evaluation of pore size spectrum of gas shale reservoirs using low pressure nitrogen adsorption, gas expansion and mercury porosimetry: A case study from the Perth and Canning Basins, Western Australia [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 112(12): 7-16.
- [24] Murphy M, Daniels J, Cole D. Pore distribution in the Ordovician shale of the Utica/Point Pleasant Sub-Basin [C]. Long Beach: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012: 22-25.
- [25] 赵迪斐, 郭英海, 解德录, 等. 基于低温氮吸附实验的页岩储层孔隙分形特征[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(6): 100-108.
- Zhao Difei, Guo Yinghai, Xie Delu, et al. Fractal characteristics of shale reservoir pores based on nitrogen adsorption [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(6): 100-108.
- [26] 胡琳, 朱炎铭, 陈尚斌, 等. 蜀南双河龙马溪组页岩孔隙结构的分形特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 79-82.
- Hu Lin, Zhu Yanming, Chen Shangbin, et al. Fractal characteristics of shale pore structure of Longmaxi formation in Shuanghe area in southern Sichuan [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(1): 79-82.
- [27] 杜佰伟, 彭清华, 谢尚克, 等. 西藏岗巴一定日盆地地下白垩统页岩气资源潜力[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 51-54.
- Du Baiwei, Peng Qinghua, Xie Shangke, et al. Exploration potential analysis of shale gas in the Lower Cretaceous, Gamba-Tingri basin of Tibet [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 51-54.
- [28] 张陈珺, 郭平, 熊健. 川南龙马溪组页岩孔隙分形特征[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(4): 15-23.
- Zhang Chenjun, Guo Ping, Xiong Jian. Fractal characteristics of shale pore of Longmaxi Formation in the south region of Sichuan Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(4): 15-23.

编辑 邹澂滢