

非常规天然气

# 鄂尔多斯盆地差异抬升对长7页岩孔隙的影响

## ——以东南部甘泉地区和南部渭北隆起地区为例

王香增<sup>1,2</sup>, 张丽霞<sup>2,3</sup>, 姜呈馥<sup>2,3</sup>, 尹锦涛<sup>2,3</sup>, 高 潮<sup>2,3</sup>, 孙建博<sup>2,3</sup>,  
尹 娜<sup>4,5</sup>, 薛莲花<sup>4</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710075;

2. 陕西省页岩气勘探开发工程技术研究中心/陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室, 陕西 西安 710075;

3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075;

4. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为对比研究差异抬升对鄂尔多斯盆地延长组长7页岩孔隙的影响,分别选取了甘泉地区G127井和渭北隆起YW1井(浅地表)2组埋深相差较大的长7<sup>3</sup>典型页岩样品,通过脉冲衰减渗透率测量、覆压孔隙度测量、氮气吸附实验及氩离子抛光—扫描电镜成像分析等方法对样品孔隙特征进行表征。结果表明:页岩储层孔隙均主要为纳米级,孔隙类型主要有粒间孔、粒内孔、微裂缝及少量有机质孔。其中,G127井有机质孔较发育,主要由于该区页岩所达最大埋深较深,样品热演化程度较高;而YW1井页岩裂缝较发育,这与盆地南部经历了强烈的构造抬升运动有关,致使YW1井页岩样品渗透率 $(1.13\sim 4.24)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 普遍高于G127井渗透率 $(0.013\sim 0.663)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。2组页岩中小于10nm微孔和中孔提供了主要的比表面积,大于10nm的中孔和大孔对孔隙体积贡献较大,其中G127井页岩平均孔径及孔径峰值均较YW1井页岩小,这与其埋深较深导致压实作用更强有关。

**关键词:**页岩;差异抬升;孔隙特征;低温氮气吸附;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2018)05-0597-09

**引用格式:**Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Jiang Chengfu, *et al.* The effect of differential uplift on pore development of Chang 7 shale in Ordos Basin: Case studies of Ganquan area and Weibei uplift area[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 597-605. [王香增, 张丽霞, 姜呈馥, 等. 鄂尔多斯盆地差异抬升对长7页岩孔隙的影响——以东南部甘泉地区和南部渭北隆起地区为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 597-605.]

## 0 引言

页岩气是一种潜在的、并且资源量巨大的非常规天然气资源<sup>[1]</sup>。Schettler等<sup>[2]</sup>通过分析美国泥盆系页岩气井的测井曲线,发现孔隙是页岩气主要存储场所,约一半的气量存储在孔隙中。页岩作为超致密非常规储层,具有低孔低渗和非均质性强的特点,其纳米级孔隙是影响页岩气储集、渗流和吸附

的重要因素<sup>[3]</sup>,因此,对其纳米孔隙结构的研究受到广泛关注<sup>[4,5]</sup>,同时也一直是页岩储层研究的重点与难点<sup>[6,7]</sup>。

鄂尔多斯盆地是我国典型的陆相沉积盆地(图1),中、新生代以来,在湖盆稳定沉降扩张期沉积了厚度较大的湖相泥页岩,已具有形成页岩气的基本地质条件和巨大潜力<sup>[8]</sup>。其中延长组长7油层组形成于湖盆发展的全盛时期,其有机质泥页岩分

布稳定、厚度大,是鄂尔多斯盆地中生界重要的烃源岩层<sup>[9]</sup>。在三叠纪末、中侏罗世、晚侏罗世末及白垩纪末,盆地发生了多期次构造抬升剥蚀事件,依次以西部、南部、东南和东部为中心发生差异抬升<sup>[10]</sup>,引起了盆地长7页岩的不同埋深。其中东南部构造相对简单,构造抬升影响较弱,长7页岩至今仍埋深较大;南部渭北隆起构造相对复杂,受构造抬升影响较强,长7页岩埋藏较浅。目前,长7页岩孔隙的相关研究主要针对盆地深埋藏页岩区<sup>[11-13]</sup>,而对渭北地区抬升大、浅埋藏页岩研究较少,尤其缺乏横向上对差异抬升所导致的不同埋深页岩储层的综合对比。

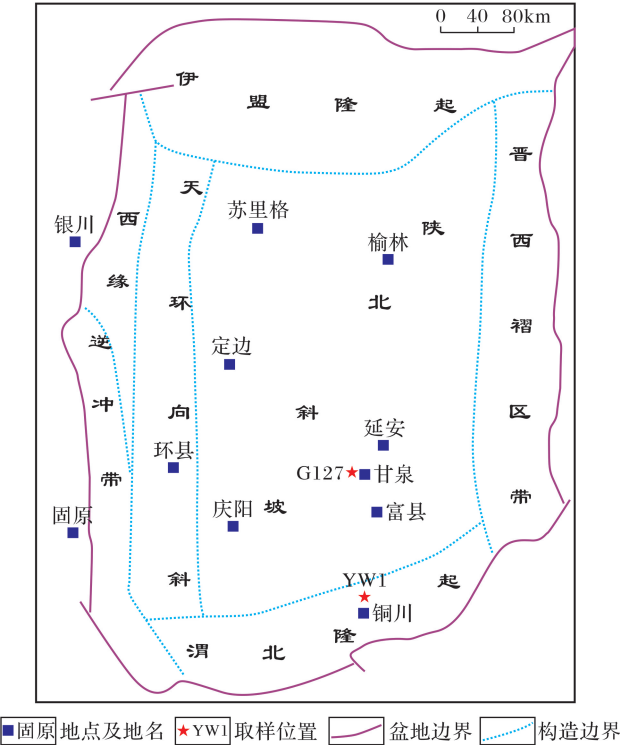


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分

Fig.1 Division of tectonic units in Ordos Basin

针对上述问题,本文分别在陕北斜坡东南部甘泉地区和渭北隆起铜川地区采集了差异抬升的页岩样品,采用氩离子抛光—高分辨率场发射扫描电镜、氮气吸附法等,从矿物组合、储层物性、孔隙类型和结构等方面对比差异抬升页岩气储层的孔隙特征,探讨造成不同孔隙特征的原因及对储层造成的影响,旨在对鄂尔多斯盆地及其邻区的页岩气勘探开发提供指导。

# 1 样品与实验分析

## 1.1 样品特征

样品采自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7黑

色页岩。浅部样品(抬升幅度大)取自渭北隆起金锁关镇何家坊地区 YW1 井,取样深度为 110~118m,样品编号为 YW1-n,有机质类型为Ⅱ<sub>1</sub>型,TOC 含量在 2.39%~14%之间,均值为 6.79%,R<sub>o</sub> 均值为 0.59%;深部样品(抬升幅度小)采自陕北斜坡东南部甘泉地区 G127 井,采样深度为 1 584~1 615m,样品编号为 G127-n,有机质类型为Ⅱ<sub>1</sub>型,TOC 含量在 3.78%~6.27%之间,R<sub>o</sub> 均值为0.98%,2 组样品均为钻井样品,具体特征见表 1。

表1 2组不同埋深页岩样品特征

Table 1 The characteristics of two groups of shale samples with different depths

样品	井深 /m	TOC /%	R <sub>o</sub> /%	孔隙度 /%	渗透率 /(×10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )
YW1-01	120.7	5.41		1.585	1.554 968
YW1-09	118.46	2.39	0.63	0.287	
YW1-25	114.52	3.89		3.42	1.133 286
YW1-33	110.57	8.24	0.61	0.462	2.644 199
YW1-37	109.66	14.00	0.53	1.867	4.243 549
G127-06	1 584.71	3.78	0.90	0.245	0.013 557
G127-19	1 610.18	4.28		1.396	
G127-21	1 611.78	5.63	0.98	0.151	0.663 814
G127-23	1 613.38	6.27	1.06	0.807	
G127-25	1 614.98	5.51		2.375	0.514 048

## 1.2 实验分析

有效孔隙度和渗透率的测定采用 PoroPDP-200 型覆压孔隙度渗透率测试仪,仪器原理基于波义耳定律,执行标准为 SY/T5336-2006 岩心分析方法。实验样品为直径 2.5cm、长度 3cm 的柱体岩心。仪器的核心部分是高精度压力传感器,精度为全量程的±0.1%,孔隙度测量范围在 0.01%~40%之间;采用压力脉冲衰减法测量渗透率,测量范围为(0.000 01~10)×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>。

低温氮气吸附实验在中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心测试完成,所采用仪器为 ASAP2020 比表面积孔径分析仪。首先用研磨仪将样品粉碎至 40~60 目,在 150℃ 的条件下真空脱气 8h,然后再通入高纯氮气,在-197℃ 条件下进行等温物理吸附—脱附测定,样品比表面积的计算选用多点 BET 模型,孔径分布选用 DFT 模型计算。

氩离子抛光—场发射扫描电镜实验采用型号为 Merlin Compact 场发射扫描电子显微镜,该仪器有卓越的分辨能力,分辨率:0.8nm @ 15kV; 1.6nm

@1kV。利用氩离子抛光系统(配备有液氮冷台)对样品进行扇形截面(扇形角度为 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 可调)和平面抛光,可实现对页岩纳米孔隙结构、类型及其孔隙成因机制的观察。

X-射线衍射实验在北京北达燕园微构分析测试中心完成。首先将样品粉碎至180目,然后通过Dmax 12kW粉末衍射仪进行定量分析页岩样品,实验时电压和电流分别为40kV和100mA,仪器扫描方式及速度分别为 $\theta/2\theta$ 、 $40(\theta)/\text{分}$ 。

## 2 不同埋深延长组长7典型页岩特征对比

### 2.1 物性特征

由表1可知,G127井样品的深度为1 584.71~1 614.98m,镜质体反射率均值为0.99%,处于低—中成熟阶段,有效孔隙度在0.25%~2.38%之间变化,孔隙发育较差;YW1井样品深度为109.7~120.7m,镜质体反射率均值为0.59%,处于未成熟阶段,样品的有效孔隙度在0.29%~3.42%之间变化,均值为1.52%。值得注意的是,2组页岩镜质体反射率均与埋深成正比关系。G127井页岩储层渗透率在 $(0.013\ 5\sim 0.663\ 0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,渗透性较差,这与前人<sup>[14-17]</sup>实验结果一致;而YW1井页岩储层渗透率在 $(1.133\ 2\sim 4.243\ 5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,普遍高于G127井,渗透性好。据美国主要产气页岩岩心分析,其总孔隙度主要分布在2.00%~14.00%之间,平均为4.22%~6.51%,渗透率一般小于 $0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ <sup>[18]</sup>,结合前人对鄂尔多斯盆地页岩气储层特征的研究,可以看出鄂尔多斯盆地延长组长7页岩的孔隙度仅处于美国页岩气储层的下限,而两者的渗透率差别不大。

### 2.2 矿物成分

2组页岩矿物组成如表2,G127井页岩矿物组成以石英(18.1%~21.7%,均值为19.9%)、长石(8.2%~10.1%,均值为9.22%)、碳酸盐(11.8%~25.7%,均值17.2%)和黏土矿物(44.8%~51.1%,均值为49.18%)为主,并含有少量黄铁矿,这与前人对甘泉地区的研究结果:黏土矿物含量高,石英含量低比较一致<sup>[14-17]</sup>;YW1井所选页岩主要矿物成分与G127井大致相同,但个别样品矿物含量有较大差别。统计结果显示石英、长石及碳酸盐等含量大于70%,而黏土矿物含量较少(图2),这与前人在该区的研究结果:脆性矿物含量高,黏土矿物含量较低

一致<sup>[19]</sup>。

表2 2组不同埋深页岩矿物组成

Table 2 Mineral composition of two groups of different depths of shale

样品	石英 /%	长石 /%	碳酸盐 /%	黄铁矿 /%	黏土矿物 /%
YW1-01	20.5	6.1	27.7	29.7	15.5
YW1-09	28.8	9.8	36.9	0.9	23.7
YW1-25	18.8	12.8	22.2	4.8	41.4
YW1-33	44.0	7.6	23.1	6.7	18.6
YW1-37	15.8	6.8	18.3	21.0	36.3
G127-06	18.1	10.1	25.7	1.2	44.8
G127-19	20.5	9.7	14.2	1.9	50.4
G127-21	21.7	8.2	11.8	4.6	51.1
G127-23	19.6	9.7	15.4	1.5	50.6
G127-25	19.3	8.5	18.9	1.3	49.0

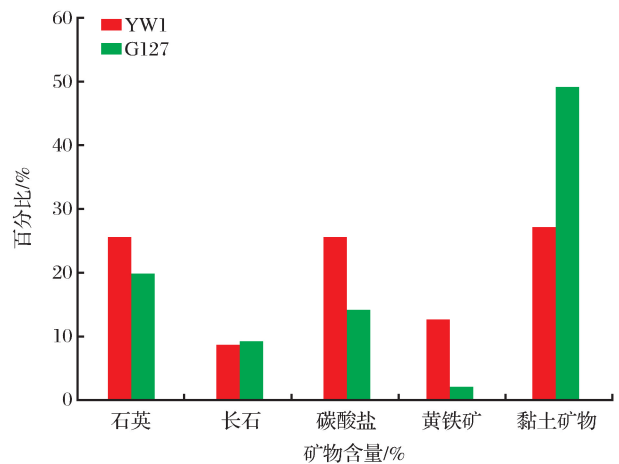


图2 2组不同埋深页岩矿物含量平均值对比

Fig.2 The contrast diagram of average mineral content of two groups of different depths of shale

### 2.3 孔隙类型与特征

Loucks等<sup>[20]</sup>将页岩孔隙划分为有机质孔、裂缝、矿物基质孔(粒内孔、粒间孔)。页岩中高有机质含量、多微孔隙与高黏土含量有利于吸附气的赋存,较大的溶蚀孔、粒间孔及微裂缝有利于游离气的赋存,同时也是天然气运移的基本通道<sup>[18,21,22]</sup>。

通过场发射扫描电镜分别对G127井、YW1井长7页岩的孔隙形态进行观察,发现两者均发育粒间孔、粒内孔、有机质孔及裂缝,主要孔隙类型与前人研究结果较一致<sup>[14-17]</sup>。总体来看,储层中孔隙均以无机孔为主,但二者也存在一些差异,比如YW1井有机孔发育较G127井少,但裂缝发育较多,这与YW1井页岩样品的渗透率普遍较高一致。此外,



G127 井中黏土矿物粒间孔较发育,且黏土矿物具有吸附性,黏土矿物粒间孔越发育,吸附能力越强<sup>[23]</sup>。

镜下观察粒间孔呈条形和窄缝状[图 3(a),图 3(c)],无规律排列,孔径分布大小不一,存在于黏土矿物之间或黏土矿物与石英、长石及有机质之间,孔隙大小与所受压实强度有较大关系,这些粒间孔为游离气提供了储集空间;干酪根热解过程中会形成大量有机酸<sup>[24]</sup>,会对黄铁矿、长石、石英及碳酸盐岩等进行溶蚀,在颗粒表面或颗粒内形成孔隙[图 3(b)]。

镜下观察单个有机质孔[图 3(d),图 3(f)]呈椭圆形、圆形等,孔径主要分布在数十纳米。其中 G127 井页岩有机质孔并不孤立赋存,很多呈蜂窝状,以充填等方式镶嵌在黏土矿物、黄铁矿等矿物中,为页岩吸附提供更多吸附位,增加页岩吸附能

力。该类孔隙的渗滤性能与它自身的排列方式有很大关系,集中于横向连续层中的有机质则可在页岩中产生很好的渗滤通道<sup>[6]</sup>。G127 井样品有机质孔较 YW1 井发育,与 G127 井样品热演化程度较 YW1 井高相符,但样品有机质孔总体发育较少,这与长 7 页岩整体演化程度较低有关。微裂缝通常是由构造运动、差异水平压实作用及页岩储层破裂作用等后生改造作用形成的<sup>[25]</sup>。本文研究中的裂缝主要发育在颗粒边缘、有机质边缘等,沿颗粒边缘发育的裂缝[图 3(g)],延展性很好,呈弯曲状态,缝长为微米级,有机质收缩缝[图 3(h)]形态呈长条形和弯曲状,缝长在微米级,缝宽在纳米级到微米级;微裂缝可成为游离态页岩气富集的储渗空间从而增加游离态页岩气的含量,同时也有助于吸附态页岩气的解析,显著提高储层的渗透性,成为页岩气开采与

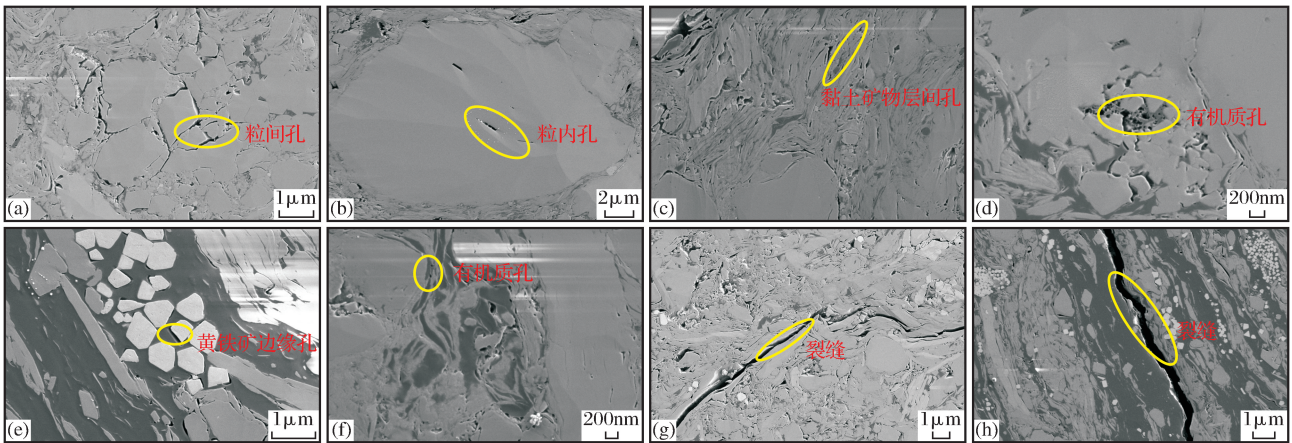


图3 长7页岩中不同类型孔隙

Fig.3 Different kinds of pores in shales

(a)粒间孔,G127 井,1 610.18m;(b)粒内孔,G127 井,1 611.78m;(c)黏土矿物层间孔,G127 井,1 611.78m;(d)有机质孔,G127 井,1 613.38m;  
(e)黄铁矿边缘孔,YW1 井,110.57m;(f)有机质孔,YW1 井,110.57m;(g)裂缝,YW1 井,109.66m;(h)裂缝,YW1 井,109.66m

运移的重要通道<sup>[26]</sup>。

## 2.4 孔隙结构特征

样品低温氮气吸附—脱附等温曲线如图 4 所示,总体上呈反 S 型,但吸附曲线在不同压力阶段的特征略有差别:在相对压力较低( $0 < P/P_0 < 0.4$ )的条件下,吸附曲线上升较为缓慢,吸附量增加也较为缓慢,曲线呈现上凸的趋势,该阶段对应吸附机理是样品表面发生的液氮分子在单分子层吸附。随着相对压力的继续增加,当相对压力处于  $0.40 < P/P_0 \leq 0.80$  的条件下时,样品吸附量增加较快,吸附等温线迅速上升,吸附曲线和脱附曲线发生分离,并出现滞后环,该阶段对应吸附机理是多分子层吸附,等温吸附线的拐点就是单分子层吸附向多分子层吸

附的过渡点<sup>[27]</sup>。在相对压力  $P/P_0 > 0.8$  的条件下,吸附曲线上升迅速,滞后环的形状可反映页岩孔隙结构的特征<sup>[28]</sup>。

根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)新建立的一种分类标准<sup>[29]</sup>,可将滞后环分为 4 种类型:H1 型、H2 型、H3 型和 H4 型。图 4 中吸附脱附曲线与 IUPAC 推荐的 H3 型回线接近,兼具 H4 型回线特征,指示页岩储层孔隙结构复杂,主要由纳米孔组成,且结构具有一定的无规则孔特征,以两端开口的平行板状孔隙、狭缝状孔隙及墨水瓶形等开放性孔为主。2 井页岩样品上升速率均较大,说明其孔隙开放程度亦较大<sup>[30]</sup>,对页岩气体的运移有利。通过观察图 4 中样品滞后环的大小发现 G127

井样品滞后环普遍大于 YW1 井,说明其孔隙形状更趋向于无规则,微孔较为发育。

G127 井和 YW1 井长 7 页岩样品的孔隙结构参数如表 3 所示,G127 井页岩样品的比表面积介于 2.415~4.767m<sup>2</sup>/g 之间,均值为 3.733m<sup>2</sup>/g;孔

体积介于 0.012 7~0.02 46m<sup>3</sup>/g 之间;平均孔径为 11.894~21.001nm。图 5 表明与 YW1 井相比,G127 井页岩比表面积平均值较高,主要由微孔提供,故 G127 井长 7 页岩样品微孔发育程度较 YW1 井好,与滞后环反映情况一致。

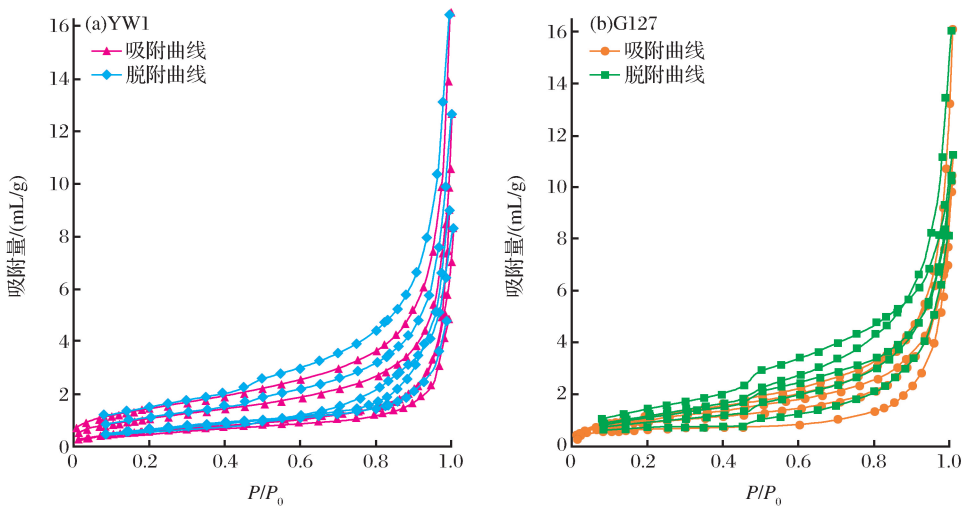


图 4 页岩低温氮气吸附-脱附等温曲线

Fig.4 Nitrogen adsorption and desorption isotherms for the five core shale samples from hydrous pyrolysis

表 3 2 组不同埋深页岩样品孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of shale samples with different depths

样品	比表面/(m <sup>2</sup> /g)	孔体积/(m <sup>3</sup> /g)	平均孔径/nm
YW1-01	1.701	0.007 2	16.361
YW1-09	2.499	0.013 6	33.042
YW1-25	2.314	0.012 7	20.970
YW1-33	3.937	0.019 8	18.889
YW1-37	5.402	0.025 5	17.604
G127-06	3.918	0.016 4	15.446
G127-25	4.315	0.024 6	21.001
G127-19	3.249	0.015 6	19.835
G127-21	4.767	0.014 9	11.894
G127-23	2.415	0.012 7	20.182

按 IUPAC<sup>[24]</sup> 分类,孔径 0~2nm 为微孔,2~50nm 为中孔,大于 50nm 为大孔。从孔径分布(图 6)可以看出,2 组页岩孔隙的孔径分布均较为复杂,YW1 井页岩储层峰值段主要集中在 2~3nm、50~100nm,其中 YW1 井 5 个样品由深到浅,孔径 8~40nm 的中孔孔隙呈现出孔隙体积和比表面积依次增大的规律。G127 井页岩储层低峰值段与 YW1 井页岩相似,高峰值段主要集中在 30~70nm 之间。大于 10nm 的中孔和大孔对 2 组页岩孔隙体

积贡献较大(图 6),是游离气赋存的主要场所;小于 10nm 微孔和中孔提供了主要的比表面积(图 5),同时是气体吸附的主要场所,能提高储层的吸附气含量<sup>[3]</sup>。

通过上述对比可以看出,鄂尔多斯盆地不同埋深的长 7 页岩,矿物成分主要以石英、长石和黏土矿物为主。其中黏土矿物以伊/蒙混层为主;2 组不同埋深页岩孔隙度普遍较低,大部分低于 3.00%,深埋样品渗透率低于浅埋样品;2 组页岩中均发育粒间孔、粒内孔、有机质孔、微裂缝和少部分黄铁矿晶间孔,且孔隙多呈开放性孔隙,并以平行板状孔为主。深埋页岩样品的 R<sub>o</sub> 值略高,其有机质孔较浅埋样品发育。

3 讨论

3.1 差异抬升对页岩孔隙类型的影响

自延长组沉积以来,鄂尔多斯盆地依次以西部、南部、东南和东部为中心发生差异抬升局部遭受剥蚀。镜质体反射率(R<sub>o</sub>) 是一个良好的有机质成熟度指标,当镜质体处于地层中最大埋深时所达到的热演化程度不会因为后期的地层抬升而变小,因此,镜质体反射率亦是判断地层曾经达到的最大埋深的有效指标。G127 井页岩 R<sub>o</sub> 均值为 0.98%,经推断

G127 井长 7 页岩在早白垩世末达到最大埋深为 2 500m,后期抬升剥蚀幅度较大,一般为 1 500m;而 YW1 井长 7 页岩  $R_o$  均值为 0.59%,推测其所在盆地南部亦在早白垩世末达到最大埋深为 2 000m,后

期抬升剥蚀幅度更大,最大可达 2 000m,这与两者埋藏史曲线相符<sup>[31]</sup>。反之,由于构造抬升作用使 2 组页岩所达最大埋深不同,致使生烃作用有差别,因此 G127 井有机质孔较 YW1 井页岩发育。

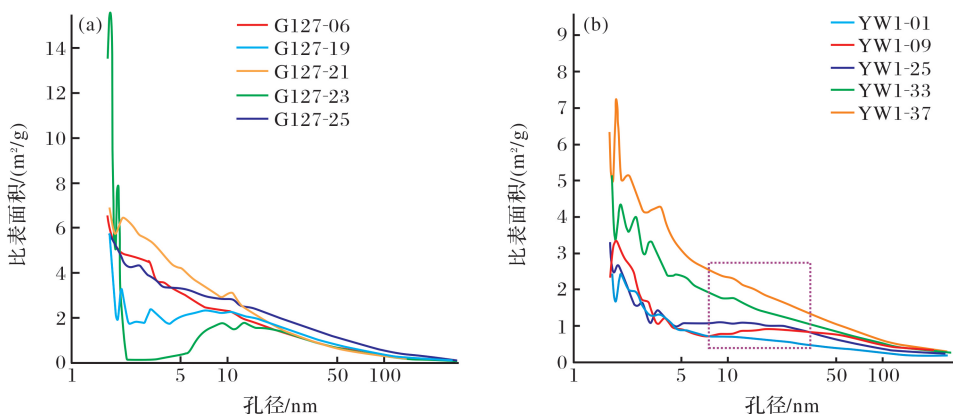


图 5 2 组不同埋深比表面积随孔径的变化率分布曲线

Fig.5 Differential surface area VS pore width with different depths

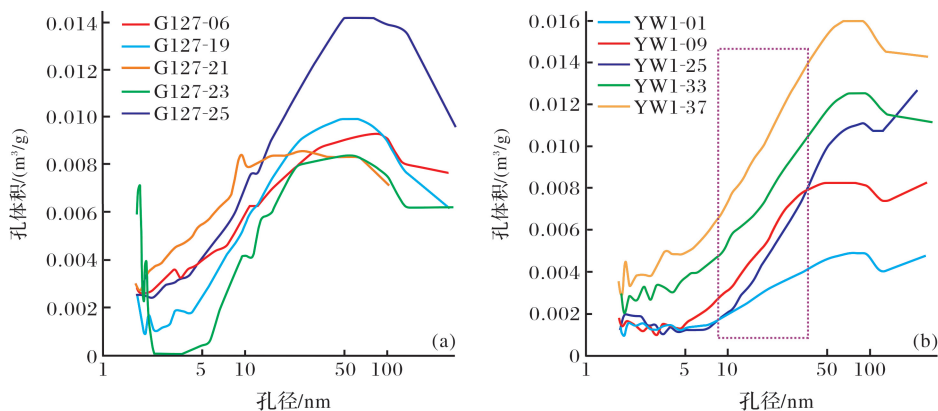


图 6 2 组不同埋深孔体积随孔径的变化率分布曲线

Fig.6 Differential pore volume VS pore width with different depths

### 3.2 差异抬升对页岩孔隙结构的影响

2 组页岩孔隙结构特征较为相似,均以两端开口的平行板状孔、狭缝状孔隙及墨水瓶形等开放孔为主,且孔隙开放程度均较大;大于 10nm 的中孔和大孔对 2 组页岩孔隙体积贡献较大,小于 10nm 微孔和中孔提供了主要的比表面积。G127 井页岩低温氮气吸附—脱附等温曲线中滞后环普遍大于 YW1 井页岩,微孔更发育,且其平均孔径及孔径峰值均显示较 YW1 井页岩小。笔者认为这可能与 G127 井抬升幅度较小,页岩埋深较深导致压实作用更强有关,且 G127 井页岩热演化程度较高,有机质孔更发育,对微孔贡献较大。

### 3.3 差异抬升对储层物性的影响

2 组页岩发生抬升运动时期及运动强度存在

差异,YW1 井所处渭北隆起受印支运动—喜马拉雅运动影响发生多期抬升剥蚀事件<sup>[32]</sup>,主要有三叠纪末、中侏罗世末、侏罗纪末、晚白垩世 4 次构造抬升剥蚀<sup>[10]</sup>,其中印支运动主要表现为垂直的升降运动,燕山运动主要表现为缓慢的隆升剥蚀作用,使得上侏罗统发生强烈的褶皱变形,隆起构造发育,且古隆起区往往剥蚀量最大,喜马拉雅运动表现很强烈,发生长期的隆升剥蚀作用,形成大量断裂<sup>[33]</sup>,其中开启性的断裂具有很高的渗透性,且随着地层剥蚀作用的进行,引起地层发生破裂,加之该区脆性矿物(石英、碳酸盐等)含量高,从而产生大面积的宏观及微观裂缝[图 3(g),图 3(h)],为页岩气运移提供了重要通道,因此 YW1 井页岩样品渗透率普遍较高。微裂缝的发育也改变了 YW1



井样品的孔隙类型从而影响其孔隙结构。G127井所处陕北斜坡构造较为简单,主要经历2次剥蚀期,即三叠世末—早侏罗世和晚白垩世,隆起构造等不发育<sup>[34]</sup>,因此抬升剥蚀量较YW1井低,且断裂发育情况较YW1井差,渗透率普遍较差。泥质沉积物一旦达到了一定的积土负载,便被压实,是一个不可逆的过程。埋藏时间和埋深是泥页岩孔隙度变化的双元函数,埋藏时间对页岩孔隙度具有持续影响,而深度效应只有当最大埋深超过之前埋深时才再次起作用,在地层抬升过程中不发生作用。即使后期地层抬升导致上部地层被侵蚀,地层压力释放,在最大埋藏深度处所形成的孔隙度也不会发生重大的改变<sup>[35]</sup>,因此2组页岩虽经历构造抬升作用不同,但孔隙度均值差别并不大。

## 4 结论

本文通过矿物组成测定、物性分析,低温氮气吸附及扫描电镜观察等测试分析手段,对鄂尔多斯盆地2组不同埋深的长7页岩样品孔隙特征进行了对比研究,得出以下结论。

(1)不同埋深的长7页岩因处于同一沉积环境,其TOC均值相近,碎屑矿物成分及含量受局部沉积条件影响而略有差异;2组页岩的孔隙均为纳米量级,孔隙类型皆以两端开口的平行板状孔隙、狭缝状孔隙及墨水瓶孔隙形等为主;2组页岩孔隙的孔径分布复杂,大于10nm的中孔和大孔对孔隙体积贡献较大,小于10nm微孔和中孔提供了主要的比表面积。

(2)埋藏较深的G127井页岩较YW1浅井页岩 $R_o$ 均值高,有机质孔更发育,孔隙形状更趋向于无规则,比表面积均值高,微孔更发育,但石英、碳酸盐含量等脆性矿物含量较YW1井低,渗透率普遍低,孔隙度均值略低。

(3)G127井页岩所达最大埋深较深,生烃作用及压实作用较强,故有机质孔较YW1井页岩发育,平均孔径及孔径峰值较小;物性差异(尤其在渗透率方面)与2组页岩所经历的构造运动有较大关联,YW1井所在渭北隆起地区经历构造运动剧烈,发育大量裂缝,致使该区页岩渗透率普遍较好。

## 参考文献(References)

[1] Dong Dazhong, Zou Cangneng, Li Jianzhong, *et al.* Potential and development prospects of shale gas resources and exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 324-

336.

董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].*地质通报*, 2011, 30(2/3): 324-336.

[2] Ma Mingfu, Li Wei, Liu Yacun, *et al.* Analysis of pore structure characteristics of reservoir in the northern oil field of Melut Basin, Sultan[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(6): 121-124.

马明福,李薇,刘亚村,等.苏丹Melut盆地北部油田储集层孔隙结构特征分析[J].*石油勘探与开发*, 2005, 32(6): 121-124.

[3] Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, *et al.* The microscopic pore structure characteristics of shale reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 301-311.

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.

[4] Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* The accumulation types, characteristics, mechanisms and prospects of conventional and unconventional oil-gas accumulation types, characteristics, mechanisms and prospects: Taking tight oil and tight gas as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.

邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].*石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.

[5] Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, *et al.* The first discovery and scientific value of nanoscale in oil and gas reservoirs and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 76(6): 1857-1864.

邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].*岩石学报*, 2011, 76(6): 1857-1864.

[6] Wang Xiangzeng, Liu Guoheng, Huang Zhilong, *et al.* The characteristics of shale reservoir of the No.7 members in Yanchang Formation of southeast Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1385-1394.

王香增,刘国恒,黄志龙,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段泥页岩储层特征[J].*天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1385-1394.

[7] He Jianhua, Ding Wenlong, Fu Jinglong, *et al.* Study on the genetic types of micropores in shale[J]. *Lithologic Reservoir*, 2014, 26(5): 30-35.

何建华,丁文龙,付景龙,等.页岩微观孔隙成因类型研究[J].*岩性油气藏*, 2014, 26(5): 30-35.

[8] Wang Xiangzeng. Advance in unconventional gas exploration and development of Yanchang Petroleum Group[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 137-145.

王香增.延长石油集团非常规天然气勘探开发进展[J].*石油学报*, 2016, 37(1): 137-145.

[9] Wang Xiangzeng, Zhang Jinchuan, Cao Jinzhou, *et al.* A preliminary discussion on evaluation of continental shale gas resources: A case study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Zhiluo-Xiasiwan area of Yanchang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 192-197.

王香增,张金川,曹金舟,等.陆相页岩气资源评价初探:以延

- 长直罗一下寺湾区中生界长7段为例[J].地学前缘,2012,19(2):192-197.
- [10] Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, *et al.* Restoration of burial history of four periods in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 43-47.
- 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 43-47.
- [11] Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, *et al.* Study on pore characteristics of rich shale by pressure mercury method and gas adsorption method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419-427.
- 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 419-427.
- [12] Pan Lei, Chen Guihua, Xu Qiang, *et al.* The pore structure characteristics of the Permian rich organic shale in the lower Yangtze region[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 787-793.
- 潘磊, 陈桂华, 徐强, 等. 下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 787-793.
- [13] Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Jiang Wenli, *et al.* Analysis on pores forming features and its influence factors of reservoir well Yuye-1[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2012, 43(10): 3954-3963.
- 龙鹏宇, 张金川, 姜文利, 等. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(10): 3954-3963.
- [14] Wang Xiangzeng, Gao Shengli, Gao Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.
- 王香增, 高胜利, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 294-304.
- [15] Wang Bing. Study on the Formation Conditions of Shale Oil and Shale Gas of Chang 7 Member in Zhidan-Ganquan Area of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- 王芮. 鄂尔多斯盆地志丹—甘泉地区延长组长7段页岩油及页岩气成藏条件研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- [16] Li Ziyuan. Study on Shale Gas Reservoir Characteristics of Chang 7 Member of Yanchang Formation in Ganquan Area of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2015.
- 李子元. 鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长7段页岩气储层特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [17] Sun Jianbo, Zhang Lixia, Jiang Chengfu, *et al.* Study on the characteristics of shale gas reservoir in the Chang 7 member of Yanchang Formation in the southeastern Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(5): 70-75.
- 孙建博, 张丽霞, 姜呈馥, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段页岩气储层特征研究[J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(5): 70-75.
- [18] Bowker K A. Barnett shale gas production, fort worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [19] Wang Shejiao, Li Denghua, Li Jianzhong, *et al.* Analysis of the exploration potential of shale gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 40-46.
- 王社教, 李登华, 李建忠, 等. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 40-46.
- [20] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, *et al.* Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrockpores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [21] Emme J J, Stancil R W. Anadarko's bossier gas play: A sleeping giant in a mature basin[J]. Search & Discovery, 2003, 8(3): 225-226.
- [22] Mavor M. Barnett Shale Gas-in-place Volume Including Sorbed and Free Gas Volume[C]. AAPG Southwest Section Meeting, Fort worth: Texas, 2003.
- [23] Chalmers GR, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the barnett, woodford, haynesville, marcellus and doig unit[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.
- [24] Andresen B. Thermal generation of carbon dioxide and organic acids from different source rocks[J]. Organic Geochemistry, 1994, 21(12): 1229-1242.
- [25] Ding Wenlong, Xu Changchun, Ju Kai, *et al.* Progress in the research of shale fractures [J]. Advance in Earth Science, 2011, 26(2): 135-144.
- 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135-144.
- [26] Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, *et al.* Basic characteristics and evaluation of shale gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12, 113-114.
- 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12, 113-114.
- [27] Zhao Pei, Li Xianqing, Tian Xingwang, *et al.* The characteristics of micro pore structure of Longmaxi shale gas reservoir in southern Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 947-956.
- 赵佩, 李贤庆, 田兴旺, 等. 川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 947-956.
- [28] Haul R. Adsorption, surface area and porosity[J]. Zeitschrift Für Physikalische Chemie, 1969, 63(1): 220-221.
- [29] Sing K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity(recommendations 1984)[J]. Pure & Applied Chemistry, 2009, 54(11): 2201-2218.
- [30] Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, *et al.* Characteristics of nano pore structure and its significance in formation of shale gas reservoirs of Longmaxi Group in Southern Sichuan[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438-444.
- 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-



- 444.
- [31] Wu Baoxiang, He Jinxian, Zhang Xiaoli, *et al.* Analysis of buried evolution and oil and gas accumulation in the Ordos Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 8-14.
- 吴保祥, 何金先, 张晓丽, 等. 鄂尔多斯盆地地层埋藏演化与油气成藏分析[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(6): 8-14.
- [32] Ren zhanli, Cui Junping, Guo Ke, *et al.* The uplift period of the Weibei uplift and fission track analysis of the uplift process in the Ordos Basin [J]. China Science Bulletin, 2015, 60(14): 1298-1309.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298-1309.
- [33] Wei Dong, Ma Zhonghao, Chen Qingshi, *et al.* Structure characteristics and coexistence of various energy and mineral resources of Mesozoic and Cenozoic of Weibei Uplift in the Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(3): 355-364.
- 魏东, 马中豪, 陈清石. 鄂尔多斯盆地渭北隆起中—新生代构造特征及多种能源矿产共存关系[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(3): 355-364.
- [34] Zhao Jingzhou, Yang Xianchao, Wu Fuli, *et al.* Discussion on the control effect of uplift background on reservoir formation and distribution Triassic formation in the Northern Shaanxi Slope area of Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 648-655.
- 赵靖舟, 杨县超, 武富礼, 等. 论隆起背景对鄂尔多斯盆地陕北斜坡区三叠系油藏形成和分布的控制作用[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 648-655.
- [35] Melver R D. Composition of Kerogen-clue to its role in the origin of petroleum [J]. Proc Seventh World Petr Cong (Mexico), 1967, 2: 25-36.

## The effect of differential uplift on pore development of Chang 7 shale in Ordos Basin: Case studies of Ganquan area and Weibei uplift area

Wang Xiang-zeng<sup>1,2</sup>, Zhang Li-xia<sup>2,3</sup>, Jiang Cheng-fu<sup>2,3</sup>, Yin Jin-tao<sup>2,3</sup>,

Gao Chao<sup>2,3</sup>, Sun Jian-bo<sup>2,3</sup>, Yin Na<sup>4,5</sup>, Xue Lian-hua<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Shaanxi Province Engineering Technology Research Center of Shale Gas Exploration and Development /

Shaanxi Province Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Development, Xi'an 710075, China;

3. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

4. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province / Key Laboratory of Petroleum Resources

Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of sciences, Lanzhou 730000, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To study the micro pore characteristics of Chang 7 shale in Ordos Basin, we select two groups of different depths of Chang 7 shale samples from Well G127 (smaller uplift) and Well YW1 (larger uplift), using Pulse attenuation permeability measurement, overburden pressure measurement, nitrogen adsorption experiment and Argon ion polishing scanning electron microscopy image analysis to characterize the pore. The results show that the pore size of shale reservoir is mainly nanoscale, and the main pore types are intergranular pore, intragranular pore, micro-fracture and a small amount of organic hole, of which organic hole is relatively well developed, which is related to the small amplitude of the uplift and the deeper burial depth of the shale. Meanwhile the fractures of Well YW1 shale which experienced strong tectonic uplift are more developed, so that the permeability of Well YW1 shale sample is generally higher than that of Well G127; Shale pore size distribution is complex, the pore shape is mainly composed of parallel plates, slit pores and ink bottle holes, which are open at both ends. Less than 10nm micropores and mesopores provide the main specific surface area. Mesopores and macropores larger than 10nm contribute greatly to pore volume. Based on the comparative study of uplifting effect on shale pore, this paper will provide reference for the exploration of shale gas and the delineation of favorable blocks in Ordos Basin.

**Key words:** Shale; Differential uplift; Pore characteristics; Low temperature nitrogen adsorption; Ordos Basin