

引用本文:张琳琳,王孔杰,赖枫鹏,等.鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组海相页岩气储层甜点分类评价[J].石油实验地质,2024,46(1): 191-201.DOI:10.11781/sydz202401191.

ZHANG Linlin, WANG Kongjie, LAI Fengpeng, et al. Classification and evaluation of sweet spots of marine shale gas reservoir in Ordovician Wulalike Formation on the western margin of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 191-201. DOI: 10.11781/sydz202401191.

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组 海相页岩气储层甜点分类评价

张琳琳^{1,2}, 王孔杰³, 赖枫鹏^{1,2}, 郭伟⁴, 苗丽丽⁵

1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;
2. 非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 中国石油 川庆钻探工程有限公司 长庆井下技术作业公司, 西安 710016;
4. 中国石油 长城钻探工程有限公司 地质研究院, 辽宁 盘锦 124010;
5. 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘要:甜点评价对页岩气藏高效勘探开发具有重要意义。以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩储层为研究对象,通过岩石薄片分析、X 射线衍射、SEM 扫描电镜、低温氮气吸附、等温吸附、总有机碳(TOC)含量、有机质镜质体反射率(R_o)测试和三轴岩石力学测试8个实验,得到目标区岩石类型为灰褐色泥页岩,孔径集中分布在2~4 nm和35~61 nm,主要发育粒间孔、黏土矿物层间孔和粒内孔;总有机碳含量平均为1.01%, R_o 值平均为1.75%,脆性指数平均为47.8%。通过分析不同因素对页岩储层甜点区评选及评价的影响,认为硅质矿物含量、黏土矿物含量、孔比表面积、总有机碳含量和 R_o 值对储层的吸附性能起决定作用,孔径大小和孔隙类型数量控制储层的储集性能,脆性矿物含量和岩石力学参数影响储层的可压性。根据地质甜点评价的吸附性能和储集性能两个指标以及工程甜点的可压性指标,完成了不同特征对应的参数指标细分类,初步建立了鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组海相页岩气储层3个等级的地质甜点和可压性甜点的分类评价方案,结果表明目标区各特征参数均达到II级标准,可以作为页岩气开发甜点区。

关键词:评价分类;室内实验;储层甜点;海相页岩气;乌拉力克组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

DOI:10.11781/sydz202401191

Classification and evaluation of sweet spots of marine shale gas reservoir in Ordovician Wulalike Formation on the western margin of Ordos Basin

ZHANG Linlin^{1,2}, WANG Kongjie³, LAI Fengpeng^{1,2}, GUO Wei⁴, MIAO Lili⁵

1. School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Energy Geological Evaluation and Development, Beijing 100083, China;
3. Changqing Downhole Technology Operation Company, CNPC Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China;
4. Geology Research Institute of GWDC, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China;
5. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Sweet spot evaluation is of great significance for efficient exploration and development of shale gas reservoirs. Taking the shale reservoir in Ordovician Wulalike Formation on the western margin of the Ordos Basin as the research object, eight experiments including rock section analysis, X-ray diffraction, SEM scanning electron microscopy, low-temperature nitrogen adsorption, isothermal adsorption, total organic carbon (TOC) content test, organic matter vitrinite reflectance (R_o) test and triaxial rock mechanics test were carried out in this study. It is found that the rock type in the target area is gray brown mud shale, with the pore size in the ranges of 2-4 nm and 35-61 nm, and

收稿日期(Received):2023-01-15;修订日期(Revised):2023-11-20;出版日期(Published):2024-01-28.

作者简介:张琳琳(1999—),女,硕士生,从事油气田开发理论与方法研究。E-mail:zhanglinlin@163.com.

通信作者:赖枫鹏(1981—),男,教授,从事非常规油气、油气田开发理论与方法研究。E-mail:laifengpeng@163.com.

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩油藏CO₂复合压裂渗吸—渗流机理及排采制度优化研究”(52174037)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

intergranular pores, clay mineral interlayer pores and intragranular pores are developed. The TOC content is 1.01%, the average R_o value is 1.75%, and the brittleness index is 47.8%. By analyzing the influence of different factors on the selection and evaluation of shale reservoir sweet spots, it is concluded that the content of siliceous minerals, clay minerals, pore specific surface area, TOC content and R_o value play a decisive role on the adsorption performance of the reservoir, the pore size and the number of pore types control the reservoir property, the content of brittle minerals and rock mechanics parameters affect the compressibility of the reservoir. According to the two indexes of adsorption property and reservoir property evaluated by geological sweet spots and the compressibility index of engineering sweet spots, the parameter indexes corresponding to different characteristics are finely classified, and a classification and evaluation scheme of geological sweet spots and compressibility sweet spots of the marine shale gas reservoir in Ordovician Wulalike Formation in the Ordos Basin is preliminarily established. The results show that all characteristic parameters in the target area meet the grade II standard. It could be a sweet spot for shale gas development.

Key words: evaluation and classification; laboratory experiment; reservoir sweet spot; marine shale gas; Wulalike Formation; Ordovician; Ordos Basin

我国埋深 4 500 m 以浅页岩气可采资源量约 $22 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 2022 年我国页岩气产量达到 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$, 涪陵、长宁—威远和昭通国家级海相页岩气示范区开发技术的提升, 有力支撑了页岩气产量的增长^[1-8]。甜点评价是页岩气实现高效勘探开发过程中的关键工作, 系统分析不同参数对页岩气甜点的影响, 明确地质甜点和工程甜点的主要特征, 以及构建甜点分级分类评价体系, 均有助于提高甜点评价效果。目前, 国内外学者主要通过建立评价模型^[9-13]和分级分类评价标准^[14-18]两种方法, 进行页岩气甜点评价研究。在评价模型研究方面, 主要有应用地球物理方法完成甜点评价指标优选^[19-20]、使用“甜点”核心参数分析法进行核心参数指标判别^[21]、利用多元参数拟合和层次分析法确定甜点参数与指标参数拟合^[22]等; 在分级分类评价标准方面, 前人在评价模型研究的基础上, 增加甜点评价指标^[23-25]及主控指标的筛选^[26], 建立了页岩气甜点评价体系。

虽然关于页岩气甜点评价的方法越来越多样, 考虑到的参数范围也越来越广泛, 但缺乏对不同参数与页岩气甜点评价关系的分析, 且各参数之间的相关性较强, 而大部分研究都是根据地质甜点参数和工程甜点参数分类进行分级评价, 很少根据地质甜点和工程甜点的主要特征进行关系相近性参数的细分类。鉴于此, 以鄂尔多斯盆地西缘某中高成熟度海相页岩气储层为研究对象, 通过岩石薄片分析、X 射线衍射、SEM 扫描电镜、低温氮气吸附、等温吸附、总有机碳 (TOC) 含量、有机质镜质体反射率 (R_o) 和三轴岩石力学测试 8 个实验, 明确不同参数对甜点评价的影响。同时, 根据页岩储层地质甜点的吸附性能和储集性能两个典型特征, 以及工程甜点的可压性特征, 进行不同特征对应的参数指标细分类, 初步建立鄂尔多斯盆地海相页岩气储层

地质甜点和可压性甜点的分类分级评价方案, 并根据建立的方案对研究区进行甜点评价分析。

1 目标区域概况

鄂尔多斯盆地是我国北方主要的页岩气开发潜力区之一, 处于多个构造单元的交接处 (图 1)^[27]。盆地西部地区面积大约为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在后期构造运动的影响下, 褶皱逆冲强烈, 变形更为复杂, 与中东部的沉积特征表现明显不同。研究区位于盆地

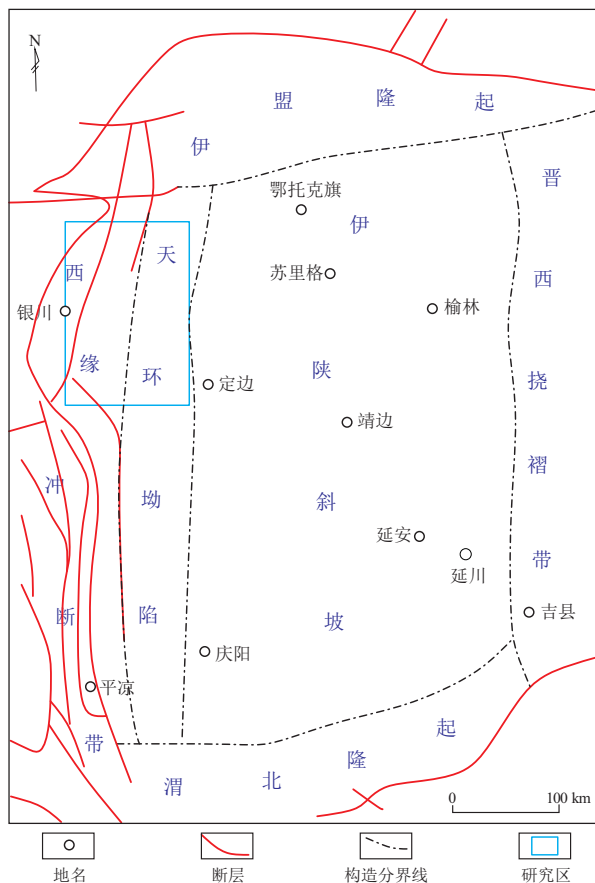


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划及研究区位置^[27]

Fig.1 Tectonic units of Ordos Basin and location of study area

西缘底部,地层发育从早奥陶世早期到中晚奥陶世,由于此期间鄂尔多斯盆地内部构造及沉积差异演化的显著性越来越高,导致研究区在演化过程中发生大幅沉降,沉积了一套中晚奥陶世泥页岩^[28]。目的层为乌拉力克组,位于下古生界奥陶系,厚度可达1 200 m^[29],具有低孔高渗、微裂缝和水平层理发育的特征。乌拉力克组普遍含气且存在局部富集,因此依据甜点评价方案明确其甜点分布,对鄂尔多斯盆地海相页岩气的勘探开发具有重要意义。

2 实验样品及步骤

2.1 样品准备

实验样品为鄂尔多斯盆地西缘某海相页岩气储层钻井岩心,取自2 861.90、2 864.43、2 864.90 m深度各两块,分别命名为R1、R2、R3、R4、R5、R6。各个样品的孔隙度和渗透率如表1所示,样品整体表现为低孔低渗特征。

2.2 实验步骤

岩石薄片分析测试按照行业标准《岩石薄片鉴定:SY/T 5368—2016》^[30],依次对岩石标本进行肉眼观察、颜色描述、致密度分类、构造描述、岩性分类及宏观结构构造观察等。X射线衍射实验流程参照行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法:SY/T 5163—2018》^[31]。SEM 扫描电镜测试流程按照行业标准《岩石样品扫描电子显微镜分析方法:SY/T 5162—2021》^[32]执行。低温氮气吸附测试参照国家标准《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积:GB/T 19587—2017》^[33]。总有机碳测定实验流程参照国家标准《沉积岩中总有机碳测定:GB/T 19145—2022》^[34]。等温吸附实验流程参照国家标准《页岩甲烷等温吸附测定方法第2部分:重量法:GB/T 35210.2—2020》^[35]。有机质镜质体反射率测试流程参照行业标准《沉积岩中镜质体反射率测定方法:SY/T 5124—2012》^[36]。三轴岩石应

力测试流程参照行业标准《岩石物理力学性质试验规程第20部分:岩石三轴压缩强度试验:DZ/T 0276.20—2015》^[37]。

3 实验结果分析

3.1 岩石学特征

3.1.1 岩石薄片分析

岩石类型以灰褐色泥页岩为主,主要由泥质组成,其次为粉砂质石英、铁白云石和有机质条带等,含有少量黄铁矿,其中泥质物约占岩石总体积的95%,粉砂质颗粒约占4%,颗粒粒径约为0.01~0.02 mm。实验观察结果如图2所示,在R1—R4不同深度样品中均有混杂分布的石英颗粒和铁白云石颗粒(图2b,d),位于储层下部的R3样品可见灰黑色零散分布的黄铁矿(图2a),约占岩石总体积的1%,说明同一井区储层的泥质含量会随着深度的改变表现出差异。除此之外,在储层上部的R1样品中可以观察到明显顺层排列分布的有机质条带(图2c)。

3.1.2 矿物组成

X射线衍射实验结果(图3)表明,储层矿物组分按含量由高到低依次为石英和黏土矿物、碳酸盐岩矿物、长石类矿物;根据国内岩石脆性指数公式(公式1)计算得到目标区脆性指数为36.23%~50.89%,平均为44.19%,达到国家标准《海相页岩气勘探目标优选方法:GB/T 35110—2017》规定的脆性较大的标准^[38],脆性矿物含量高,为勘探甜点区优选、储层实施压裂改造及人工裂缝的形成提供了重要前提保证。

$$BI = \frac{m_{\text{qua}}}{m_{\text{qua}} + m_{\text{cla}} + m_{\text{car}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:BI为脆性指数,单位%; m_{qua} 为石英含量,单位%; m_{cla} 为黏土矿物含量,单位%; m_{car} 为碳酸盐岩矿物含量,单位%。

储层黏土矿物组成主要为伊利石和伊蒙混层,其次为绿泥石,蒙皂石最少(图4),不同深度样品表现相似。黏土矿物对页岩气吸附能力的大小主要取决于伊蒙混层和高岭石^[39],对页岩气储集能力的影响程度主要受控于伊利石和高岭石^[40]。研究区样品的伊利石和伊蒙混层含量较高,平均含量分别为50.50%和28.83%,因此该储层在利于压裂改造的情况下,其吸附性能和储集能力也较好。

3.2 微观孔隙结构特征

3.2.1 扫描电镜实验

从实验结果(图5)可以看到,不同深度的样品

表1 实验样品孔渗数据

Table 1 Pore and permeability data of experimental samples

样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
R1	2 861.90	2.11	0.062
R2	2 861.90	2.47	0.085
R3	2 864.43	1.64	0.077
R4	2 864.43	1.73	0.910
R5	2 864.90	1.97	0.590
R6	2 864.90	2.08	0.053

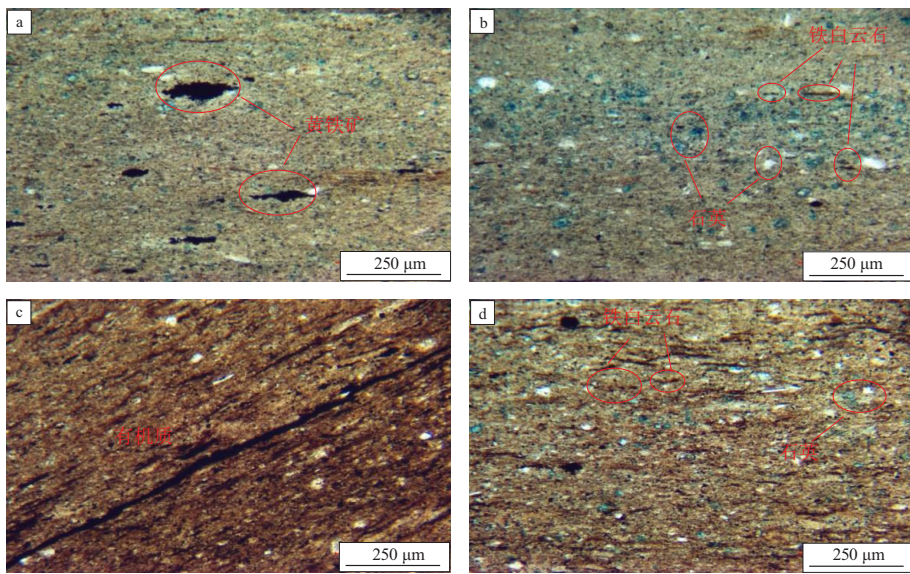


图 2 光学显微镜下的矿物分布

a.R3 样品,黄铁矿散状分布;b.R4 样品,细小的石英颗粒、铁白云石混杂分布;
c.R1 样品,有机质条带定向排列;d.R2 样品,零星分布的铁白云石颗粒和石英颗粒。

Fig.2 Mineral distribution under light microscope

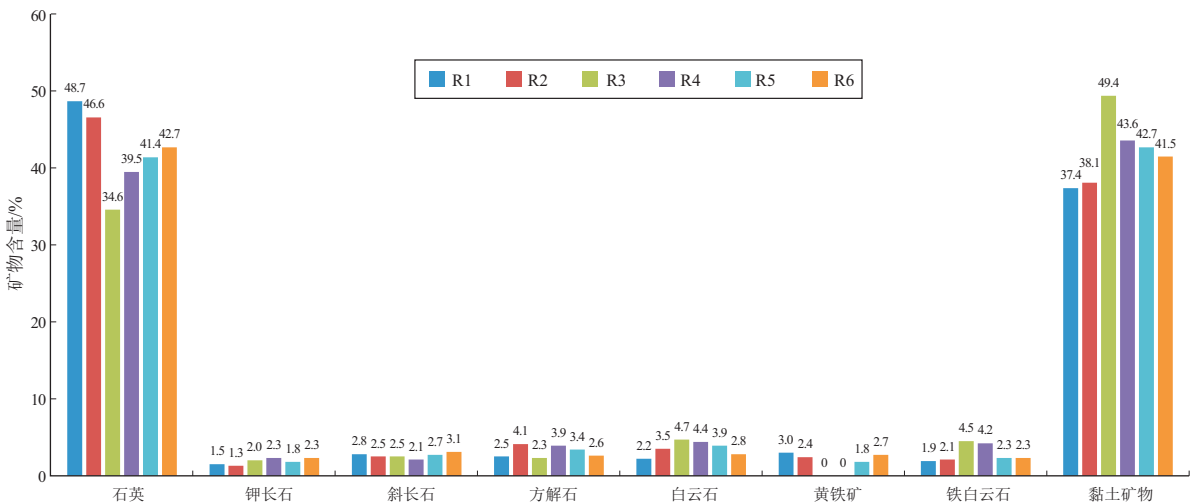


图 3 X 射线衍射实验矿物含量

Fig.3 Mineral contents obtained by X-ray diffraction experiment

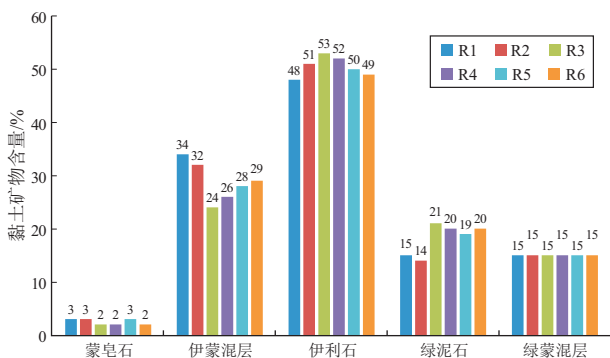


图 4 X 射线衍射实验黏土矿物含量

Fig.4 Clay mineral contents obtained by X-ray diffraction experiment

均发育粒内孔、粒间孔及黏土矿物层间孔 3 种孔隙类型,少见有机质孔。其中,黄铁矿晶间孔占粒内孔比例最大(图 5c,f),呈草莓状或裙带状分布,多以介孔为主,在分散的黄铁矿晶体间可见少量孤立或聚集分布的不规则有机质孔;粒间孔(晶间孔)里宏孔占比居多,存在于碎屑颗粒间和一些未被有机质与黏土充填的晶体间(图 5a,e),多呈不规则状分布;黏土矿物层间孔大多呈窄条状分布,长度在几微米到几十纳米之间,被有机质充填(图 5b,d),同时具备黏土矿物的吸附及储集性能。整体上看,研究区发育的孔隙类型丰富,孔径多以介孔为主,储层的吸附能力和储集能力俱佳。

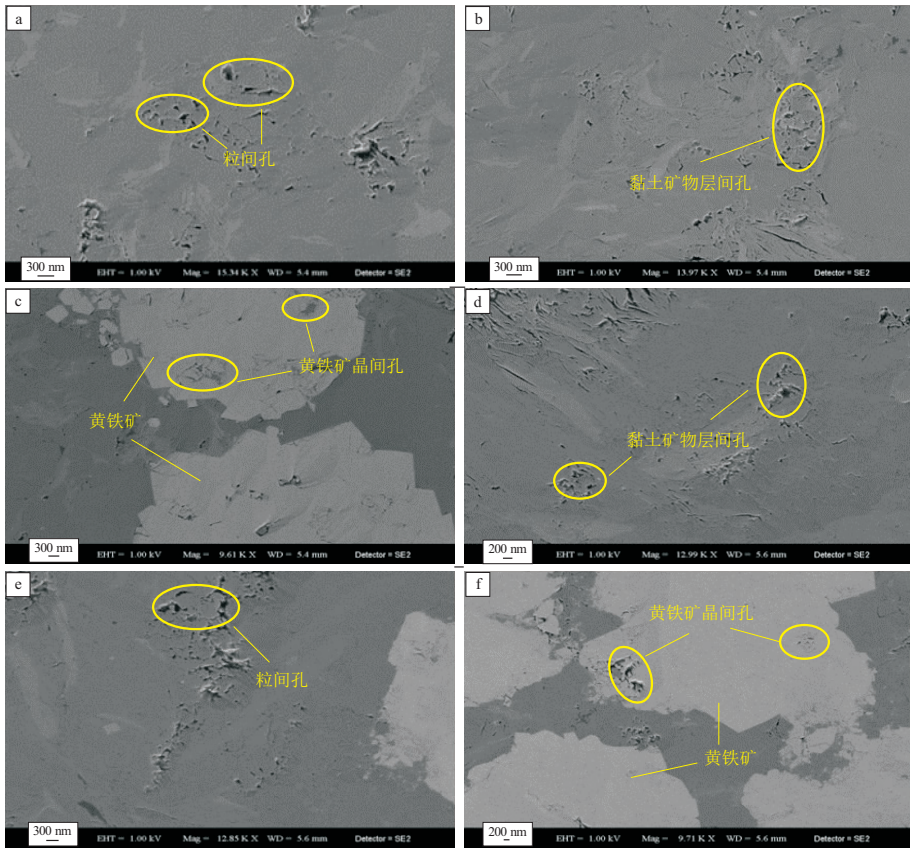


图 5 样品扫描电镜实验结果

a.R1 样品,发育粒间孔;b.R2 样品,发育黏土矿物层间孔;c.R1 样品,黄铁矿内的晶间孔;
d.R4 样品,发育黏土矿物层间孔;e.R5 样品,发育粒间孔;f.R6 样品,发育黄铁矿及粒内孔。

Fig.5 SEM results of the samples

3.2.2 低温氮气吸附实验

通过低温氮气吸附实验,研究储层的孔隙体积和孔比表面积特征。实验得到的微孔孔径分布如图 6 所示,样品的孔隙体积分布均表现为“双峰”特点,峰值对应的孔径分别为 2~4 nm 和 35~61 nm。根据 BET 和 BJH 方法计算得到平均孔径(表 2),深度较小样品 R1、R2 的平均孔径相对较大,但总体上表现为介孔(2~50 nm)占比最大,有

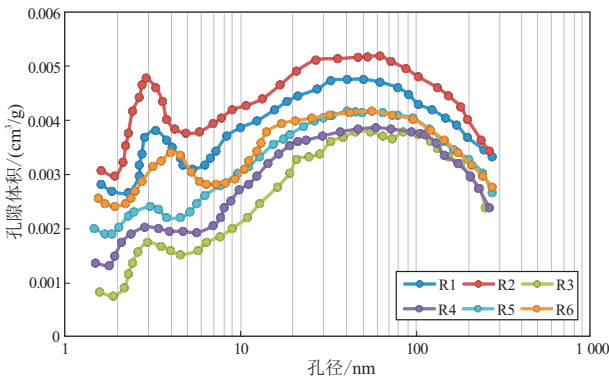


图 6 微孔孔径分布

Fig.6 Pore size distribution of micropores

表 2 低温氮气吸附测试孔径解释结果

Table 2 Pore size interpretation results of low temperature nitrogen adsorption test

样品编号	BET		BJH 吸附	BJH 脱附
	比表面积/ (cm ² /g)	平均孔径/ nm	平均孔径/ nm	平均孔径/ nm
R1	13.46	12.99	13.08	12.13
R2	15.37	13.12	13.64	12.14
R3	19.66	7.78	8.90	7.43
R4	18.46	8.31	9.63	7.94
R5	17.19	9.97	10.08	9.55
R6	16.83	10.33	11.70	10.25

利于页岩气的储集。BET 比表面解释表明(表 2),深度较大样品 R3—R6 的孔比表面积大,为 16.83~19.66 cm²/g,深度较小样品 R1、R2 的孔比表面积小,为 13.46~15.37 cm²/g。

实验结果表明,孔径越小的样品其孔比表面积越大。孔径决定了页岩气的储集能力,孔比表面积是页岩气吸附性能的主控因素。研究区不同深度表现出的孔径、孔比表面积虽然略有不同,但整体上都利于页岩气的吸附和储集,具有甜点开发区的

表 3 样品总有机碳含量测定和等温吸附实验数据

Table 3 TOC content determination and isothermal adsorption test data

样品 编号	总有机碳 含量/%	等温吸附实验数据			
		最大气体绝对 吸附量/(m ³ /t)	兰氏体积/ (m ³ /t)	兰氏压力/ MPa	吸附相密度/ (g/mL)
R1	0.85	0.74	0.98	15.38	0.29
R2	0.91	0.93	1.04	13.44	0.25
R3	1.14	1.19	1.26	14.57	0.27
R4	1.09	1.18	1.12	11.21	0.27
R5	1.03	1.13	1.07	12.33	0.26
R6	1.01	1.07	1.11	14.08	0.28

良好特征。

3.3 储层地球化学特征

3.3.1 总有机碳含量与等温吸附测试

总有机碳含量测定结果(表 3)表明,研究区深度大样品的总有机碳含量值较深度小样品略大,整体有机质含量平均为 1.005%。根据我国页岩气资源/储量计算与评价技术规范^[41],总有机碳含量 1% 以上的页岩储层即具有生烃潜力,研究区储层虽有机质丰度较低,但为有效海相烃源岩,可以生烃。

根据等温吸附测试结果(表 3),兰氏体积平均为 1.11 m³/t,表明该区域吸附能力较强;兰氏压力平均为 13.65 MPa,页岩气吸附量增加主要集中在高压区段;吸附相密度平均为 0.27 g/mL。在等温吸附图(图 7)中, V_{ex} 为过剩吸附量, V_{abs} 为绝对吸附量,其中深度较大样品 R3—R6 的最大气体绝对吸附量较 R1、R2 样品的大。

根据实验结果可以看到,样品的最大气体绝对吸附量与总有机碳含量具有较好的正相关关系,进一步表明了总有机碳含量通过控制页岩气的吸附能力来影响泥页岩甜点评价。

3.3.2 有机质镜质体反射率

测试结果表明,泥页岩镜质体反射率分布在

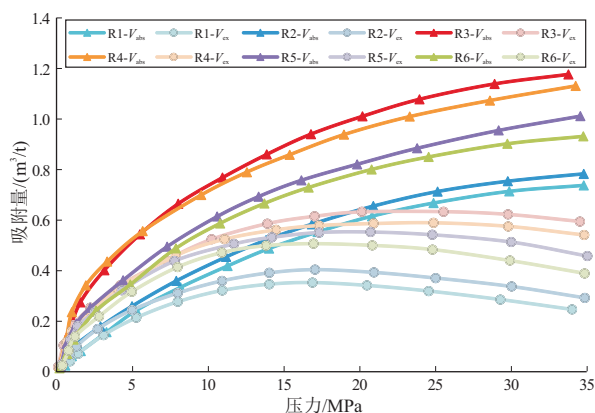


图 7 样品等温吸附曲线

Fig.7 Isothermal adsorption curves of samples

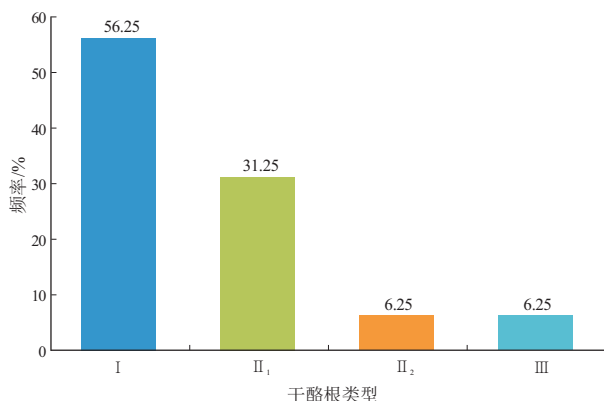


图 8 泥页岩有机质类型频率分布

Fig.8 Histogram of frequency distribution of mud shale organic matter types

1.52%~1.98% 范围内,平均为 1.71%,主要为 I 型(腐泥型),其次为 II₁ 型(腐殖腐泥型)(图 8)。烃源岩整体表现为高成熟生气阶段。燕继红等^[42]通过热模拟实验发现泥页岩的高演化程度对吸附性能有影响。当烃源岩处于中高演化程度(R_o 介于 0.7%~3.5%)时,泥页岩孔隙以大孔为主,有机质孔隙发育且表面粗糙,利于页岩气吸附的比表面积也较大;当烃源岩处于低水平或过高演化阶段时,孔隙体积小且孔隙变光滑,孔比表面积变小,从而导致页岩的吸附能力变差。

3.3.3 三轴岩石应力

三轴应力实验测试结果如表 4 所示。根据最大和最小水平主应力计算(公式 2)得到样品的地应力差异系数分布在 0.071 8~0.08 范围内,页岩储层的地应力差异系数在影响压裂后裂缝形态的同时也控制了体积压裂缝网的形成,对储层可压裂性有一定影响。

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H} \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为地应力差异系数,无量纲; σ_H 为最大水

表4 样品三轴应力实验结果
Table 4 Triaxial stress test results of the samples

参数	样品编号					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
杨氏模量/GPa	39.6	42.9	43.8	41.5	40.8	40.2
泊松比	0.18	0.23	0.24	0.23	0.22	0.19
脆性指数/%	56.36	47.99	46.43	47.30	48.95	54.66
最大水平主应力/MPa	81.72	79.77	79.58	80.12	80.67	81.22
最小水平主应力/MPa	75.60	73.59	73.21	74.30	74.88	75.21
水平应力差/MPa	6.12	6.18	6.37	5.82	5.79	6.01
最小水平主应力梯/(MPa/m)	0.026 4	0.025 7	0.025 6	0.025 9	0.026 1	0.026 3

平主应力,单位 MPa; σ_h 为最小水平主应力,单位 MPa。

根据国内基于岩石力学参数的简易脆性指数计算方法(公式3),计算得到岩石脆性指数为46.43%~56.36%,平均为51.395%,与基于矿物组分计算得到的脆性指数相近。研究区不同深度样品的地应力差异系数和脆性指数相差不大,且地应力差异系数平均值低于0.3,脆性指数平均值大于50%,脆性程度较高,因此在人工压裂的作用下易形成可作为甜点开发区的缝网。

$$BI = \frac{0.6895E - 28\mu - 1}{14} \times 100 + 80 \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量,单位 10^4 MPa; μ 为泊松比,无量纲; BI 为脆性指数,单位%。

4 甜点评价分类

页岩气甜点一般指储层物性好、富有机质、可进行压裂改造并具商业开采价值的层位或区域,主要包括地质甜点和工程甜点两方面^[43-45]。

4.1 地质甜点分类评价

根据实验研究得到,孔隙类型、孔径大小控制了页岩气储集性能;孔比表面积、总有机碳含量通过影响页岩气的吸附量控制了其吸附性能; R_0 值通过影响页岩气的生成间接控制了其吸附性能;黏土矿物组分对页岩气的储集性能和吸附性能具有双重影响。页岩气的吸附性能和储集性能是地质甜点评价的主要指标,因此以两个指标为相近关系的判别标准,进行不同特征对应的参数指标细分分析。

在地质甜点评价中:①通过对同类型页岩气藏调研认为^[23],硅质组分的增加会伴随黏土矿物含量的减少,即页岩储层的吸附能力会随之减弱,因此认为45%为甜点评价中硅质矿物和黏土矿物组分含量的极佳值,35%为两个参数的下限值;②通

过对其他地区同类型气藏分析得到,海相页岩的解吸气量与比表面积具有较好的正相关性,认为比表面积 $5.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 是页岩气富集的下限,当其大于 $14.1 \text{ m}^2/\text{g}$ 时,页岩的吸附能力好,页岩气富集明显;③通过其他学者对同一区域的地质特征研究^[46]得到,海相泥页岩甜点区的生烃下限为总有机碳含量0.5%,大于0.7%的烃源岩为甜点区优选;④通过总结国内外研究成果^[39]认为,有机质成熟度处在0.7%~3.5%范围内时适合成为海相泥页岩的甜点区,储层的吸附能力最强出现在 R_0 为2.6%左右,此时孔隙以大孔为主,同时吸附的比表面积达到最大;⑤通过该区域孔隙结构特征分析认为,介孔占比高,孔隙体积大的区域为海相页岩气甜点区。一般介孔的孔径范围为2~50 nm,因此将2 nm作为甜点评价的孔径下限;粒内孔和黏土矿物层间孔多以介孔为主,粒间孔中宏孔占比居多,从而发育任一种孔隙类型的储层都可以作为甜点区。根据以上两个指标7个参数将地质甜点划分为I(充分具备甜点区优选条件)、II(基本达到甜点区评选标准)、III(未达到作为甜点开发的标准)三个等级,建立的鄂尔多斯盆地海相页岩气储层地质甜点分类评价如表5所示。

研究区的脆性矿物含量为34.6%~48.7%,黏土矿物含量为37.4%~49.4%,孔比表面积为 $13.46 \sim 19.66 \text{ cm}^2/\text{g}$,总有机碳含量为0.85%~1.14%, R_0 值为1.52%~1.98%,孔径为7.78~13.64 nm,发育粒间孔、粒内孔和黏土矿物层间孔三种孔隙类型,所有参数都在地质甜点分类评价中的II级以上,说明研究区的吸附能力和储集能力符合成为甜点区的标准,可进行勘探开发。

4.2 可压性分类评价

根据实验研究得到,脆性矿物含量、泊松比和杨氏模量通过控制脆性指数,最大和最小水平主应力通过控制地应力差异系数,分别对页岩气的可压性特征造成一定程度的影响。本文从储层的可压

表 5 鄂尔多斯盆地海相页岩气储层地质甜点分类评价

Table 5 Classification and evaluation of geological sweet spots of marine shale gas reservoir in Ordos Basin

参数	储层分类		
	I 级	II 级	III 级
硅质矿物含量/%	>45	35~45	<35
黏土矿物含量/%	>45	35~45	<35
吸附性能 孔比表面积/(cm ² /g)	>14.1	5.2~14.1	<5.2
总有机碳含量/%	>0.7	0.5~0.7	<0.5
R_o /%	2.6~3.5	0.7~2.6	<0.7 或 >3.5
孔径大小/nm	>50	2~50	<2
储集性能 孔隙类型数量	发育的孔隙类型多于 3 种	至少发育一种孔径在介孔及介孔以上的孔隙	发育的孔隙孔径均以微孔为主

性特征方面进行工程甜点评价研究,因此以脆性指数和地应力差异系数为主要参数进行分级分析。

可压性甜点评价中:①通过总结前人研究结果^[47]得到,当页岩储层的脆性指数大于 50%时,脆性表现最优,有利于页岩储层进行压裂改造,而国家标准《海相页岩气勘探目标优选方法:GB/T 35110—2017》^[38]中认为脆性指数大于 35%时页岩脆性较大,因此将 35%作为可压性评价中脆性指数的下限;②根据国外研究成果,地应力差异系数影响了裂缝分布形态,当其小于 0.3 时,储层越易形成复杂网络状的压裂改造缝网,当数值超过 0.3 后,形成的裂缝数量较多,但逐渐由复杂交错向简单转变,当数值超过 0.5 后,形成的裂缝数量减少,且呈对称规律分布,因此将 0.5 作为可形成复杂网络缝的地应力差异系数上限。根据以上 2 个参数将可压性甜点划分为 I、II、III(等级概念同地质甜点)三个等级,建立的鄂尔多斯盆地海相页岩气储层可压性甜点分类评价如表 6 所示。

研究区根据脆性矿物和岩石力学参数计算得到的脆性指数分别为 36.23%~50.89%、46.43%~56.36%,地应力差异系数为 0.071 8~0.08,全部在可压性甜点分类评价方案的 II 级以上,说明研究区的可压性特征较好,可在压裂改造措施后形成缝网,有利于页岩气的开采。

5 结论

(1) 储层岩石类型为灰褐色泥页岩,黏土矿物

表 6 鄂尔多斯盆地海相页岩气储层可压性甜点分类评价
Table 6 Classification and evaluation of compressibility sweet spots of marine shale gas reservoir in Ordos Basin

参数	储层分类		
	I 级	II 级	III 级
脆性指数/%	>50	35~50	<35
地应力差异系数	0~0.3	0.3~0.5	>0.5

以伊利石和伊蒙混层为主;孔径范围集中分布在 2~4 nm 和 35~61 nm,主要发育的孔隙类型为粒间孔、黏土矿物层间孔和粒内孔;总有机碳含量平均为 1.005%,镜质体反射率平均为 1.75%;根据矿物含量和岩石力学参数计算得到脆性指数分别平均为 44.19%和 51.4%。

(2) 脆性矿物含量、杨氏模量、泊松比影响脆性指数及储层实施压裂可能性;烃源岩吸附气量主控因素为岩石有机质数量与分布、有机质成熟度;黏土矿物内发育的微孔结构、孔比表面积、有机质孔及总有机碳含量与页岩气储层的吸附能力具有较好的正相关关系;矿物连接形成的缝隙、不同空间展布的孔隙类型和孔隙体积决定了储集层的储集能力。

(3) 鄂尔多斯盆地海相页岩气储层地质甜点分类评价应重点考虑硅质矿物含量、黏土矿物含量、孔比表面积、总有机碳含量、 R_o 值、孔径大小和孔隙类型数量;建立了鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组海相页岩气储层可压性甜点分类评价方案,工程甜点评价应以脆性指数和地应力差异系数为主要参数;目标区所有参数都达到了 II 级分类标准,初步认为可作为甜点开发区。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

张琳琳完成实验操作,参与论文撰写及修改;王孔杰参与实验设计;赖枫鹏参与实验设计和论文修改;郭伟和苗丽丽完成实验操作。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

ZHANG Linlin completed experimental operation, and participated in manuscript drafting and modification. WANG Kongjie participated in experimental design. LAI Fengpeng participated in experimental design and manuscript modification. GUO Wei and MIAO Lili completed experimental operation. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 李娟,陈雷,计玉冰,等.浅层海相页岩含气性特征及其主控因素:以昭通太阳区块下志留统龙马溪组为例[J].石油实验地质,2023,45(2):296-306.
LI Juan, CHEN Lei, JI Yubing, et al. Gas-bearing characteristics and major controlling factors of shallow marine shale: a case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Taiyang block of Zhaotong area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(2): 296-306.
- [2] 杨振恒,陶国亮,鲍云杰,等.南海相深层页岩气储集空间差异化发育及保持机理探讨[J].石油实验地质,2022,44(5):845-853.
YANG Zhenheng, TAO Guoliang, BAO Yunjie, et al. Differential development and maintenance mechanism of reservoir space for marine shale gas in South China's deep strata [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 845-853.
- [3] 薛冈,熊炜,张培先.常压页岩气藏成因分析与有效开发:以四川盆地东南缘地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例[J].油气藏评价与开发,2023,13(5):668-675.
XUE Gang, XIONG Wei, ZHANG Peixian. Genesis analysis and effective development of normal pressure shale gas reservoir: a case of Wufeng-Longmaxi shale gas reservoir in southeast margin of Sichuan Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(5): 668-675.
- [4] 张驰,周彤,肖佳林,等.涪陵页岩气田加密井压裂技术的实践与认识[J].断块油气田,2022,29(6):775-779.
ZHANG Chi, ZHOU Tong, XIAO Jialin, et al. Practice and knowledge of fracturing technology for infill wells in Fuling shale gas field [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(6): 775-779.
- [5] 韩珊,车明光,苏旺,等.四川盆地威远区块页岩气单井产量预测方法及应用[J].特种油气藏,2022,29(6):141-149.
HAN Shan, CHE Mingguang, SU Wang, et al. Prediction method and application of single shale gas well production in Weiyuan block Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 141-149.
- [6] 刘伟新,卢飞龙,叶德嫫,等.川东南地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气异常压力封存箱剖析与形成机制[J].石油实验地质,2022,44(5):804-814.
LIU Weixin, LU Longfei, YE Deliao, et al. Significance and formation mechanism of abnormally pressured compartments of shale gas in the Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 804-814.
- [7] 聂舟,马诗杰,伍秋姿,等.长宁地区海相页岩天然裂缝发育特征及其对含气性的影响[J].断块油气田,2022,29(5):591-597.
NIE Zhou, MA Shijie, WU Qiuzi, et al. Development characteristics of natural fractures in marine shale in Changning area and their influence on gas-bearing properties [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 591-597.
- [8] 李鹏飞.四川盆地页岩气立体开发缝控压裂技术应用[J].特种油气藏,2023,30(2):168-174.
LI Pengfei. Application of fracture-controlled fracturing technology in tridimensional development of shale gas in Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(2): 168-174.
- [9] 廖东良,路保平,陈延军.页岩气地质甜点评价方法:以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J].石油学报,2019,40(2):144-151.
LIAO Dongliang, LU Baoping, CHEN Yanjun. An evaluation method of geological sweet spots of shale gas reservoir: a case study of the Jiaoshiba Gas Field, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(2): 144-151.
- [10] 曾义金.深层页岩气开发工程技术进展[J].石油科学通报,2019,4(3):233-241.
ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(3): 233-241.
- [11] 林魂,孙新毅,宋西翔,等.基于改进人工神经网络的页岩气井产量预测模型研究[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):467-473.
LIN Hun, SUN Xinyi, SONG Xixiang, et al. A model for shale gas well production prediction based on improved artificial neural network [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(4): 467-473.
- [12] 房大志,刘洪,庞进,等.考虑吸附气影响的页岩气井三产项产能计算方法[J].特种油气藏,2023,30(3):137-142.
FANG Dazhi, LIU Hong, PANG Jin, et al. A trinomial deliverability calculation method for shale gas wells considering the effect of adsorbed gas [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(3): 137-142.
- [13] 李东晖,田玲钰,聂海宽,等.基于模糊层次分析法的页岩气井产能影响因素分析及综合评价模型:以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):417-428.
LI Donghui, TIAN Lingyu, NIE Haikuan, et al. Factor analysis and comprehensive evaluation model of shale gas well productivity based on fuzzy analytic hierarchy process: taking Jiaoshiba shale gas field in Sichuan Basin as an example [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(3): 417-428.
- [14] TINNIN B, MCHESNEY MD, BELLO H. Multi-source data integration: Eagle Ford shale sweet spot mapping [C] // Unconventional Resources Technology Conference. San Antonio, Texas, USA: SEG, 2015: 624-631.
- [15] 黄进,吴雷泽,游园,等.涪陵页岩气水平井工程甜点评价与应用[J].石油钻探技术,2016,44(3):16-20.
HUANG Jin, WU Leize, YOU Yuan, et al. The evaluation and application of engineering sweet spots in a horizontal well in the Fuling shale gas reservoir [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3): 16-20.
- [16] 王志伟,赵永刚,阴钰毅,等.页岩气“甜点”地震预测研究:以鄂尔多斯盆地西缘中上奥陶统为例[J].石油地质与工程,2020,34(1):37-41.
WANG Zhiwei, ZHAO Yonggang, YIN Yuyi, et al. Seismic prediction of "sweet spots" for shale gas [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2020, 34(1): 37-41.
- [17] 张少龙,闫建平,石学文,等.深层页岩气甜点分类的地质—工程评价指标体系及应用:以四川盆地LZ地区五峰组—龙

- 马溪组为例[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(9):3666-3680.
- ZHANG Shaolong, YAN Jianping, SHI Xuewen, et al. Geological and engineering evaluation index system for deep shale gas sweet spots classification and its application: a case of Wufeng-Longmaxi formations in LZ area, Sichuan Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9):3666-3680.
- [18] 程建, 周小进, 刘超英, 等. 中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 229-237.
- CHENG Jian, ZHOU Xiaojin, LIU Chaoying, et al. Strategic area selection and key exploration fields in central and western large basins[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 229-237.
- [19] NAIDES CH. Petrophysical analysis method to identify "sweet spots" in tight gas reservoirs: case study from Punta Rosada Formation in Neuquen Basin, Argentina [C]//SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Lima, Peru; Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-16.
- [20] 周德华, 焦方正. 页岩气“甜点”评价与预测: 以四川盆地建南地区侏罗系为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 109-114.
- ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng. Evaluation and prediction of shale gas "sweet spots": a case study in Jurassic of Jiannan area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 109-114.
- [21] 陈勇. 页岩气地质甜点敏感参数优选及应用[J]. 石化技术, 2020, 27(1): 65-66.
- CHEN Yong. Optimization and application of sensitive parameters for shale gas geological desserts[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(1): 65-66.
- [22] 王红岩, 刘钰洋, 张晓伟, 等. 基于层次分析法的页岩气储层地质工程一体化甜点评价: 以昭通页岩气示范区太阳页岩气田海坝地区 X 井区为例[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 92-109.
- WANG Hongyan, LIU Yuyang, ZHANG Xiaowei, et al. Geology-engineering intergration shale gas sweet spot evaluation based on analytic hierarchy process: application to Zhaotong shale gas demonstration district, Taiyang Shale Gas Field, Haiba area, X well region[J]. Earth Sciences, 2023, 48(1): 92-109.
- [23] 何希鹏. 四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 59-71.
- HE Xipeng. Sweet spot evaluation system and enrichment and high yield influential factors of shale gas in Nanchuan area of eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 59-71.
- [24] 秦明阳, 郭建华, 黄俨然, 等. 四川盆地外复杂地质条件区海相页岩气“甜点区”优选: 以湘西北地区古生界为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 596-606.
- QIN Mingyang, GUO Jianhua, HUANG Yanran, et al. "Sweet spots zone" optimization of marine shale gas in complex geological conditions area out of Sichuan Basin: a case of Paleozoic in northwestern Hunan, China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 596-606.
- [25] 梁兴, 王高成, 徐政语, 等. 中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术: 以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 33-42.
- LIANG Xing, WANG Gaocheng, XU Zhengyu, et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: a case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 33-42.
- [26] 刘双莲. 页岩气“双甜点”参数测井评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 1005-1012.
- LIU Shuanglian. Logging evaluation of "double sweet spot" in shale gas reservoirs [J]. Oil and Gas Geology, 2022, 43(4): 1005-1012.
- [27] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 33-44.
- FU Suotang, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 33-44.
- [28] 张艳妮, 李荣西, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩沉积环境及有机质富集机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3401-3417.
- ZHANG Yanni, LI Rongxi, XI Shengli, et al. Sedimentary environments and organic matter enrichment mechanism of Ordovician Wulalike Formation shale, western Ordos Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3401-3417.
- [29] 黄军平, 黄正良, 刘立航, 等. 鄂尔多斯盆地乌拉力克组页岩储层孔径表征及其主控因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3418-3433.
- HUANG Junping, HUANG Zhengliang, LIU Lihang, et al. Pore size characterization and their mainly controlling factors in Wulalike Formation shale, Ordos Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3418-3433.
- [30] 国家能源局. 岩石薄片鉴定: SY/T 5368—2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- National Energy Administration. Rock section identification: SY/T 5368-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [31] 国家能源局. 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法: SY/T 5163—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- National Energy Administration. X-ray diffraction analysis of clay minerals and common non-clay minerals in sedimentary rocks: SY/T 5163-2018[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [32] 国家能源局. 岩石样品扫描电子显微镜分析方法: SY/T 5162—2021[S]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- National Energy Administration. Scanning electron microscopy method for rock sample analysis: SY/T 5162-2021[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积: GB/T 19587—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determina-

- tion of the specific surface area of solids by gas adsorption using the BET method; GB/T 19587-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [34] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 沉积岩中总有机碳测定; GB/T 19145—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination for total organic carbon in sedimentary rock; GB/T 19145-2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [35] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 页岩甲烷等温吸附测定方法第2部分: 重量法; GB/T 35210.2—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination methods of methane isothermal adsorption of shale—part 2: gravimetric method; GB/T 35210.2-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [36] 国家能源局. 沉积岩中镜质体反射率测定方法; SY/T 5124—2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- National Energy Administration. Method for determination of vitrinite reflectance in sedimentary rocks; SY/T 5124-2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [37] 中华人民共和国国土资源部. 岩石物理力学性质试验规程第20部分: 岩石三轴压缩强度试验; DZ/T 0276.20—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Regulation for testing the physical and mechanical properties of rock—part 20; test for determining the strength of rock in triaxial compression; DZ/T 0276.20-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海相页岩气勘探目标优选方法; GB/T 35110—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Target optimization methods for marine shale gas exploration; GB/T 35110-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [39] 吉利明, 邱军利, 宋之光, 等. 黏土岩孔隙内表面积对甲烷吸附能力的影响 [J]. 地球化学, 2014, 43(3): 238-244.
- Ji Liming, Qiu Junli, Song Zhiguang, et al. Impact of internal surface area of pores in clay rocks on their adsorption capacity of methane [J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 238-244.
- [40] 翟常博, 邓模, 曹清古, 等. 川东地区上二叠统龙潭组泥页岩基本特征及页岩气勘探潜力 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 921-932.
- Zhai Changbo, Deng Mo, Cao Qinggu, et al. Basic characteristics and exploration potential of shale gas in Longtan Formation of Upper Permian eastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6): 921-932.
- [41] 中华人民共和国国土资源部. 页岩气资源/储量计算与评价技术规范; DZ/T 0254—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Technical specification for calculation and evaluation of shale gas resources/reserves; DZ/T 0254-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [42] 燕继红, 李启桂, 朱祥. 四川盆地及周缘下寒武统页岩气成藏主控因素与勘探方向 [J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 445-452.
- Yan Jihong, Li Qigui, Zhu Xiang. Main factors controlling shale gas accumulation and exploration targets in the Lower Cambrian, Sichuan Basin and its periphery [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 445-452.
- [43] 葛勋, 郭彤楼, 黎茂稳, 等. 深层页岩储层“工程甜点”评价与优选; 以川南永川—丁山地区为例 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 210-221.
- Ge Xun, Guo Tonglou, Li Maowen, et al. Evaluation and optimization of “engineering sweet spot” in deep shale reservoir; case study on Yongchuan and Dingshan areas in southern Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(2): 210-221.
- [44] 张成林, 杨学锋, 赵圣贤, 等. 川南自贡区块页岩储层最佳靶体优选 [J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 496-505.
- Zhang Chenglin, Yang Xuefeng, Zhao Shengxian, et al. Target position optimization for shale reservoirs in Zigong Block of southern Sichuan Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(3): 496-505.
- [45] 沈骋, 范宇, 曾波, 等. 渝西区块页岩气储层改造优化对策与适应性分析 [J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 131-139.
- Shen Cheng, Fan Yu, Zeng Bo, et al. Optimization strategies and adaptability analysis of shale gas reservoir stimulation in western Chongqing Block [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(2): 131-139.
- [46] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力; 以忠平1井为例 [J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1235-1246.
- Xi Shengli, Mo Wuling, Liu Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin; case study of well Zhongping 1 [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1235-1246.
- [47] 王鹏, 纪友亮, 潘仁芳, 等. 页岩脆性的综合评价方法: 以四川盆地W区下志留统龙马溪组为例 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 48-53.
- Wang Peng, Ji Youliang, Pan Renfang, et al. A comprehensive evaluation methodology of shale brittleness: a case study from the Lower Silurian Longmaxi Fm in block W, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 48-53.