

文章编号:1009-9603(2021)01-0095-11

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.01.012

鄂尔多斯盆地东南部延长组七段页岩发育特征及勘探潜力

谷志宇¹,刘恩涛¹,王香增²,李荣西³,许家省¹,周豹⁴

(1.中国地质大学(武汉)海洋学院,湖北武汉 430074; 2.陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西西安 710075;
3.长安大学地球科学与资源学院,陕西西安 710054; 4.湖北省地质调查院,湖北武汉 430030)

摘要:鄂尔多斯盆地油气资源丰富,延长组七段(长七段)发育的优质烃源岩是该盆地页岩气的重点勘探层系。前期对盆地东南部长七段页岩发育特征缺乏系统分析,不能准确反映研究区页岩气勘探潜力。为此,以鄂尔多斯盆地东南部长七段页岩为研究对象,在页岩发育特征研究的基础上,综合采用岩相法和五项指标法,从页岩的生气潜力、储气潜力和开发潜力3个方面进行评价。岩相法用于评价储气潜力,通过页岩的总有机碳含量、脆性矿物(石英、长石和碳酸盐等)含量和黏土矿物相对含量,将长七段页岩划分为四大类,其中深色富有机质脆性页岩的开发潜力最高。五项指标法通过选用不同的五项指标组合,对生气潜力和开发潜力进行评价;其中,生气潜力评价指标为吸附气比例、有机质转化率、气体干燥系数、总有机碳含量和镜质组反射率;选取页岩的厚度、脆性矿物含量、地层压力系数、总有机碳含量和镜质组反射率五项指标分析页岩的开发潜力。综合2种方法获得的分析结果,优选出N3、N5、N6、N7和N10为研究区长七段页岩最有利的5个高勘探潜力层段。

关键词:延长组;页岩气;储层特征;勘探潜力;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Development characteristics and exploration potential of shale in Chang7 Member in southeast of Ordos Basin

GU Zhiyu¹, LIU Entao¹, Wang Xiangzeng², LI Rongxi³, XU Jiaying¹, ZHOU Bao⁴

(1.College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China; 2.Shaanxi Yanchang Petroleum(Group)Corp., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China;
3.School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710054, China; 4.Hubei Geological Survey Institute, Wuhan City, Hubei Province, 430030, China)

Abstract: Ordos Basin is rich in hydrocarbon resources, in which the organic-rich shale in Chang7 Member of Yanchang Formation is an important stratum for shale gas exploration. The previous studies lack systematic analysis of the shale in Chang7 Member in the southeast of Ordos Basin, which fail to accurately reflect the real exploration potential of shale. Based on the analysis of development characteristic, we take the shale in Chang7 Member in the southeast of Ordos Basin as the research object to evaluate its exploration potential from three aspects: gas generation potential, gas storage potential, and development potential by petrographic analysis and the five-index methods. The petrographic analysis is used to evaluate gas storage potential. In terms of total organic carbon content, content of brittle minerals (quartz, feldspar, carbonate, etc.), and relative content of clay minerals, the shale in Chang7 Member is divided into four categories, among which dark organic-rich brittle shale has the highest development potential. The five-index method is adopted to evaluate gas generation potential and development potential through the combination of five indexes. The indexes for evaluating gas generation

收稿日期:2020-08-18。

作者简介:谷志宇(1997—),男,安徽马鞍山人,在读硕士研究生,从事沉积学、石油地质学方面的研究工作。E-mail:870483438@qq.com。

通信作者:刘恩涛(1986—),男,湖北武汉人,副教授,博士。E-mail:liuentao@cug.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划课题“基于特征同位素及指示组分的资源类矿产品产地识别关键技术研究”(2018YFF0215400),国家自然科学基金项目“构造热事件对伊利石形成过程的控制:以北部湾盆地岩浆侵入地区为例”(41702121)。

potential are gas absorption ratio, organic-matter conversion rate, gas drying coefficient, total organic carbon content, and vitrinite reflectance; those for development potential are shale thickness, content of brittle minerals, formation pressure coefficient, total organic carbon content, and vitrinite reflectance. Finally, the data obtained by the two methods are combined to select five horizons with the most favorable exploration potential of shale in Chang7 Member: N3, N5, N6, N7, and N10.

Key words: Yanchang Formation; shale gas; reservoir characteristics; exploration potential; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地东南部地区在中生代广泛发育海陆过渡相沉积,发育分布稳定且厚度较大的泥质岩系,形成一套具有充足生烃潜力的沉积岩,经过长期的地质演化形成良好的生油岩,具有丰富的页岩气资源。延长石油(集团)有限责任公司于2008年开始对鄂尔多斯盆地东南部地区进行陆相页岩气资源勘探,发现盆地内部延长组陆相页岩层系具备良好的页岩气成藏条件,具有相当规模的页岩气资源量。2011年中国第1口陆相页岩气井(柳坪177井)取得重大勘探突破,获得工业气流,显示出鄂尔多斯盆地延长组具有巨大的页岩气勘探潜力^[1-2]。

中外学者对鄂尔多斯盆地延长组页岩的地质背景、成藏条件及富集规律等进行了大量的研究工作,但是针对盆地东南部长七段页岩的研究较少,对其页岩发育特征缺乏系统研究,页岩气勘探潜力不明确。杨超等研究表明,页岩发育粒间孔、粒内孔、晶间孔、溶蚀孔、有机孔及微裂缝6种微观孔隙类型,其中黏土矿物集合体粒间孔和层间粒内孔对页岩气的赋存和运移贡献最大^[3]。姜呈馥等认为研究区长七段页岩气勘探资源潜力巨大,志丹-甘泉一线西南部为页岩气勘探的有利目标^[4]。王香增等总结出鄂尔多斯盆地中生界陆相页岩气的地质特征,并采用容积法估算长七段页岩气总资源量为 $5\ 318.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。王永炜等认为盆地热演化差异性、低熟油气生成机理以及生烃期古地层压力研究等是解决鄂尔多斯盆地页岩气勘探地质研究的关键理论问题^[6]。程玉群等认为延长组页岩气的成因为偏腐泥质型烃源岩热解形成的原油伴生气^[7]。综上所述,前人对鄂尔多斯盆地延长组页岩气勘探潜力评价主要参照传统的油气资源评价方法,仅考虑总有机碳含量(TOC)、镜质组反射率(R_o)和脆性矿物含量等有限的参数,且以往研究通常以整个长七段为研究对象,评价精度不够,不能准确地反映出长七段内部各层系勘探潜力的差异性。

近年来,国际上有许多关于页岩气勘探潜力评价方法及参数的探讨和报道,强调多参数、多角度精细评价,但在中国页岩气勘探中应用较少。例如,JARVIE等提出了页岩气五项星状图来评价页岩气潜力,综合考虑各种储层参数,可以准确揭示

页岩气勘探潜力的主要影响因素^[8]。ALEXANDER等通过在星状图中引入阴影区来构建页岩油气窗^[9]。BURNAMAN等认为有利的页岩气层系须具备高TOC值和一定的单层页岩厚度(至少约为45 m),以此来确定水力压裂的垂直作用范围^[10]。ANNA等首次在星状图中引入多页岩地层数据,用于对比不同地区页岩气勘探潜力的差异性^[11]。中国针对页岩气勘探潜力评价主要按照传统的油气资源评价方法,评价参数有限,效果不理想,不能满足页岩气勘探开发需要,为此,笔者选用国际上最新提出的岩相法和五项指标法,从页岩的生气潜力、储气潜力和开发潜力3个方面对鄂尔多斯盆地东南部长七段页岩进行评价,并综合2种方法获得的分析结果,确定有利勘探潜力层段,以期对鄂尔多斯盆地页岩气靶区优选提供新思路。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块,为经历多期构造运动叠加的残余克拉通盆地,其地层以单斜形式向西倾斜^[3]。研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部,区域上为倾角小于 1° 的平缓西倾单斜构造(图1)。三叠系延长组为湖泊-三角洲沉积,地层厚度大,发育一套完整的陆相湖泊沉积体系。盆地三叠纪延长组的沉积过程也是湖盆出现、发展至消亡的过程,自长十段至长七段沉积时期反映出湖泊从生成到鼎盛阶段的全过程^[12]。

在长七段沉积时期,盆地受构造作用影响,湖盆扩张至最大,主要发育深湖-半深湖沉积。岩性主要为灰黑色泥岩、粉砂质砂泥岩互层,发育槽状交错层理。长七段顶面埋深从西部定边地区近2 400 m向东逐渐变浅,在甘泉-直罗地区埋深为1 500~1 800 m,埋深差异约为900 m,页岩顶面埋深为800~900 m,呈现出东高西低的特征^[2]。

2 页岩发育特征

2.1 有机质丰度

鄂尔多斯盆地东南部地化测试资料表明,长七段页岩的TOC值为1.76%~5.88%,平均为3.24%,

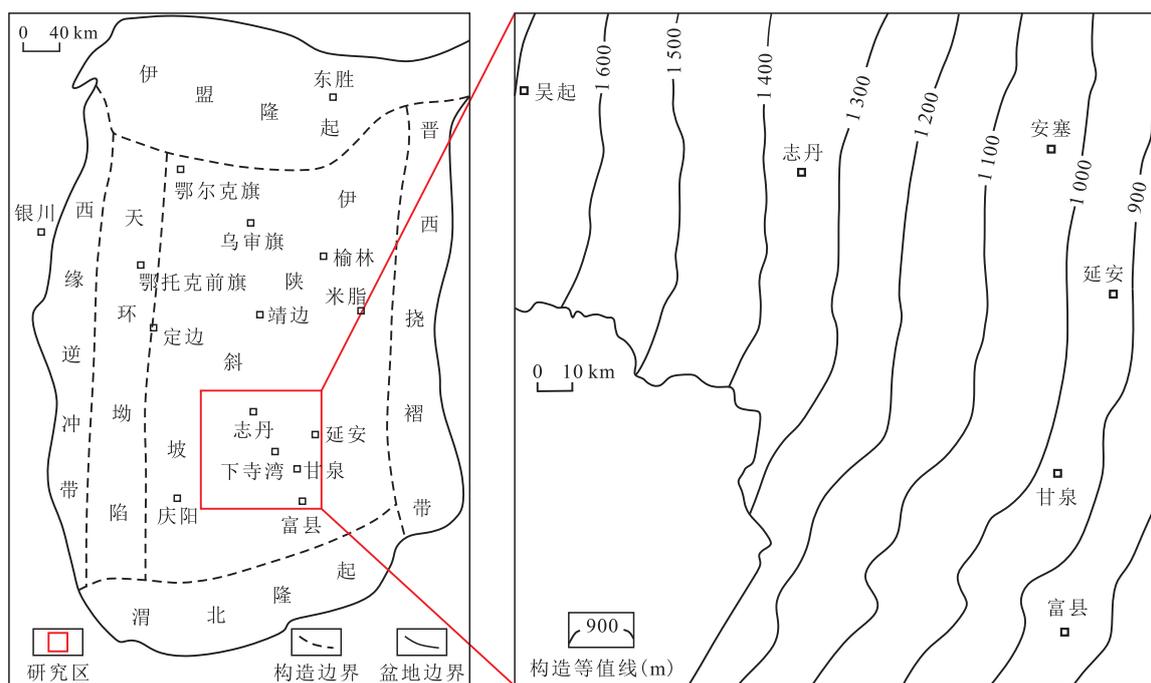


图1 鄂尔多斯盆地东南部长七段顶面构造特征

Fig.1 Tectonic characteristics of top surface of Chang7 Member in the southeast of Ordos Basin

表现出中等偏高的特征; R_o 值主要为0.51%~1.25%,平均为1.02%;高有机质成熟度页岩主要分布于吴堡-马家砭-张家湾一带, R_o 值一般大于1.1%,并以此为中心向东北、西南方向成熟度逐渐降低^[13]。以上数据证实,鄂尔多斯盆地东南部长七段页岩有机质处于成熟阶段,具有较强的生排烃能力^[14-16]。

2.2 有机质类型

显微组分鉴定结果显示,腐泥组所占比例最大,平均质量占比为42.1%;壳质组次之,平均质量占比为36.8%;惰质组一般不发育。根据范氏图,长七段页岩的H/C原子比较高,平均值为0.9;O/C原子比较低,平均值为0.05,样品主要落在II₁型干酪根区域,仅有3个样品落入II₂型干酪根区域。页岩样品热解分析结果显示,长七段页岩的氢指数偏低,为50~400 mg/g;最高热解峰温为349~459℃,平均为442℃;降解率为5.5%~42%。综合以上分析认为,研究区长七段页岩有机质类型以II₁型干酪根为主。

2.3 页岩厚度

在晚三叠世早期,鄂尔多斯盆地处于湖盆发育期,发育三角洲-河流相沉积。三大湖盆的沉积中心位于吴堡、马家砭和张家湾附近,最大沉积厚度依次为80,120和110 m,且页岩有效厚度以此为中心向东北、西南两侧逐渐变薄。但研究区东部的沉积厚度变化较明显,安塞-延安一线的页岩厚度低

至10 m以下,而西边吴起一带页岩厚度仍有40 m^[17-19]。

2.4 储集特征

全岩X射线衍射分析结果显示,研究区长七段页岩矿物成分主要为石英、长石和黏土矿物,少量的碳酸盐和黄铁矿。其中石英含量为18%~44%,平均为32.4%;长石含量为7%~44%,平均为19.8%;黏土矿物含量为37%~71%,平均为58.6%;碳酸盐含量平均为5%,黄铁矿含量平均为0.6%。对不同页岩样品的分析数据进行对比,发现差异性较大(图2)^[20-21]。矿物组成会影响页岩的可压裂性、孔裂隙发育程度及气体吸附性能。实验结果显示:石英和长石等脆性矿物含量高,有利于后期压裂改造形成裂缝;膨胀性黏土矿物不利于后期储层的压裂改造,也不利于后期压裂注水开发等增产措施的实施^[22-23]。

与中国陆相页岩包括川西坳陷须五段页岩、黄骅坳陷沙河街组页岩、川东北自流井组页岩和济阳坳陷沙河街组页岩矿物组成的对比结果(图3,表1)表明,受沉积环境、物源和成岩作用影响,研究区长七段页岩具有高黏土矿物、低石英、低碳酸盐矿物的组成特征,与川西坳陷须五段页岩部分储层相似^[24-32]。

页岩的储集物性主要受孔隙度、渗透率、储层厚度及裂缝等因素影响,与常规储层相比,页岩的储层物性往往更差,且即使在不同陆相页岩储层

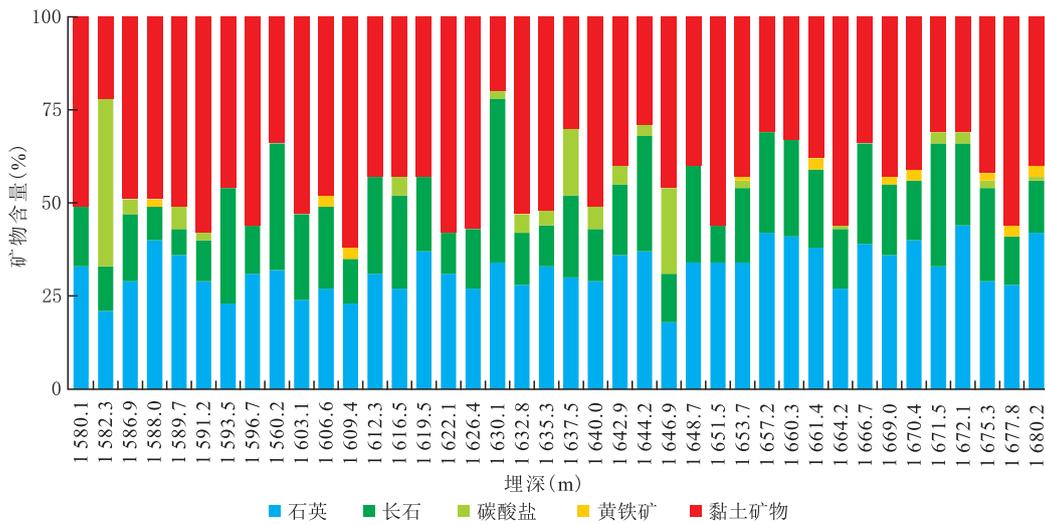


图2 鄂尔多斯盆地东南部长七段页岩矿物组成分布

Fig.2 Mineral composition distribution of shale in Chang7 Member in the southeast of Ordos Basin

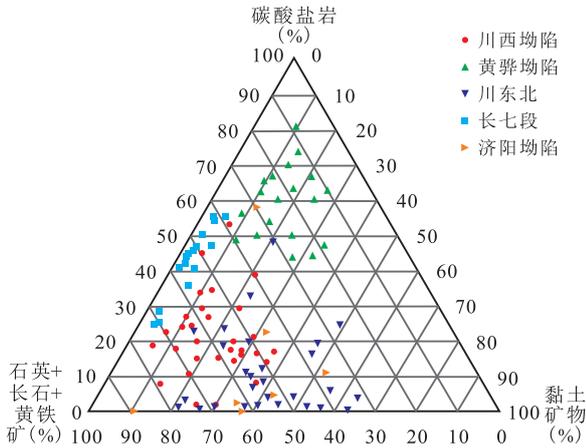


图3 中国主要含油气盆地陆相页岩矿物组成对比

Fig.3 Ternary plot for mineral compositions of continental shale in main oil and gas bearing basins of China

内,其物性差距也十分明显(表1)。MONTGOMERY等总结了大量分析测试结果,认为美国主要产气页岩储层岩心的总孔隙度为2.0%~14.0%,测井孔隙度为4.0%~12.0%,平均为5.2%;渗透率一般小于0.1 mD,平均喉道半径小于0.005 mm^[33]。而中国陆相页岩之间的孔隙度和渗透率参数相差巨大,孔隙度主要为0.5%~13.6%,渗透率主要为0.000 1~18 mD;其中,延长组页岩岩心的物性实验结果表明,其孔隙度的变化范围较大,为0.5%~3.5%,平均为1.82%;渗透率为0.005 1~6 mD,平均为0.163 mD,为典型的低孔低渗透储层^[6,33-34]。

虽然研究区长七段页岩自身的储集物性较差,但其发育多种微观孔隙类型,以粒内孔和粒间孔为主,少量有机孔,孔隙直径一般小于0.005 mm,孔隙

表1 中国主要含油气盆地陆相页岩发育特征

Table1 Distribution and characteristics of continental shale in main oil and gas bearing basins of China

地区	地层	厚度 (m)	TOC (%)	R _o (%)	有机质类型	脆性矿物含量 (%)	黏土矿物含量 (%)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	地层压力系数	含气饱和度 (%)	饱和吸附气量 (m ³ /t)	气体干燥系数 (%)
黄骅坳陷	沙河街组	130	2.0~2.5	0.5~2.5	II ₁ , II ₂	35.7~84.7	6.8~37.4	0.9~13.5	0.1~18	1.1~1.3	73	2.7~4.72	92
泌阳凹陷	核桃园组	90	2.0~2.98	1.1~1.7	I, II ₁	67.1~76.3	12.2~21.15	3.91~8.92	0.009 9~1	1.4~1.8	50	2.5~6.1	62
川东北	自流井组	230	0.47~2.44	1.39~1.73	II ₁ , II ₂	70.9~79.8	18.2~27.6	0.78~3.67	0.005~0.918	0.9~1.12	75	4.2~6.42	80
川西坳陷	须五段	145	0.5~5.0	0.49~2.54	III	50.2~89.8	2.59~41.8	2.20~11.9	0.000 1~0.067 8	1.3~1.74	45	1.1~2.66	69
济阳坳陷	沙河街组	90	0.92~5.67	0.49~0.94	I, II ₁	35.2~79.8	18.9~56.2	1.3~13.6	1~10	1.03~1.34	62	1.9~3.3	53
鄂尔多斯盆地	延长组	75	1.76~5.88	0.51~1.25	II ₁ , II ₂	26.7~69.8	37.2~71.3	0.5~3.5	0.005 1~6	0.92~1.2	61	2.37~5.34	83

之间具有较好的连通性。除孔隙之外,裂缝也会极大地影响储层的储集性能和后期改造能力。研究区主要发育微裂隙,这些裂缝必将在改善页岩储集物性及后期压裂改造过程中发挥重要作用。

3 勘探潜力

与常规油气勘探技术将页岩段作为均质层看待不同的是,页岩油气勘探往往需要更精细地研究页岩储层的储集性能、有机地化参数和油气富集方式等方面的差异变化,以明确页岩油气有利发育层段。基于常规测井资料,对鄂尔多斯盆地长七段页岩进行小层对比,根据岩心观察和录井资料开展精细页岩气勘探潜力评价,将研究区长七段页岩分为11层,分别命名为N1—N11(表2)。

页岩气勘探主要考虑3个关键因素,即页岩的含气性、储气性和工业可开发性。页岩含气性与生气潜力息息相关,只有具备生气潜力的页岩才具有形成大规模页岩气藏的物质基础;页岩储气性影响着页岩气的聚集与赋存;而页岩气的开发离不开压裂这一增产手段,其中矿物成分,特别是石英、长石和碳酸盐等脆性矿物的含量是影响页岩可压裂性的主要因素^[35]。笔者根据岩相法和五项指标法评价出研究区页岩气勘探开发最有利层段,即利于生气、储气且易于开发的层段,以此作为勘探开发的重点层段^[36]。

3.1 岩相法评价

与北美地区页岩气和四川盆地龙马溪组海相页岩气不同,鄂尔多斯盆地页岩属于陆相湖盆页岩,其岩相复杂、相变快、非均质性强,且不同岩相

储集性能和生烃能力差异较大。因此,须进行岩相研究,以明确有利岩相类型及分布,为页岩油气“甜点”预测提供依据。

近年来,在北美页岩气勘探开发中针对页岩岩相学进行了大量研究,WANG等利用岩心测试数据和测井曲线将北美地区Marcellus页岩识别出8个页岩岩相,借此来判断页岩气的储气潜力等^[37-38](图4)。页岩气的主要成分为游离气和吸附气,天然气可以游离态储存于页岩天然裂缝和粒间孔隙中,也可吸附于干酪根和黏土颗粒表面,故需从2个方面考虑储层储气能力的决定性因素^[39-41]。为此,综合考虑孔隙结构和黏土矿物对储气能力的影响,通过页岩的TOC、脆性矿物(石英、长石和碳酸盐等)含量和黏土矿物相对含量等,将研究区页岩划分为深色富有机质脆性页岩、深色富有机质塑性页岩、灰色脆性页岩和灰色塑性页岩共4种岩相类型,并对其储气能力进行评价^[42]。

深色富有机质脆性页岩是指脆性矿物含量高(达45%)、TOC值大于2.5%的页岩。高TOC值反映高生烃潜力,而脆性矿物含量高则有利于页岩储层发育良好的孔隙和喉道,有利于页岩气的储存与运输,所以深色富有机质脆性页岩被认为是页岩气的高储气潜力层段。深色富有机质塑性页岩富含黏土矿物和有机质,其中黏土矿物含量超过55%,TOC值大于1%;由于其具有较高的黏土矿物含量,孔隙与喉道被黏土矿物堵塞,导致储层的孔隙度和渗透率大幅降低,难以储气,而后期又很难通过水力压裂建立大范围的人工裂缝网络,因此储气潜力一般。灰色脆性页岩以高脆性矿物含量和低TOC值为特征,其脆性矿物含量一般大于25%,TOC值小于

表2 延页12井长七段页岩勘探潜力评价结果
Table2 Exploration potential evaluation of shale in Well YY12 of Chang7 Member

页岩层位	埋深(m)	R _o (%)	TOC(%)	有机质转化率(%)	地层压力系数	脆性矿物含量(%)	黏土矿物含量(%)	气体干燥系数(%)	吸附气比例(%)	岩相法高储气潜力层段(m)	五项指标法评价结果		高勘探潜力层段(m)
											高生气潜力层段(m)	高开发潜力层段(m)	
N1	1 588.8~1 593.1	0.95	2.5	78	0.72	34.0	62	83	56		1 590.8~1 592.9		
N2	1 609.2~1 613.6	1.30	2.9	88	0.82	70.0	28	87	62	1 609.2~1 612.3	1 609.2~1 613.2		
N3	1 613.6~1 617.9	1.35	3.7	90	0.80	71.0	29	87	63	1 615.8~1 617.9	1 614.3~1 617.9	1 615.3~1 617.9	1 615.8~1 617.9
N4	1 617.9~1 622.2	1.30	3.8	90	0.83	71.5	28	88	61	1 617.9~1 622.2	1 621.5~1 622.2	1 617.9~1 619.9	
N5	1 622.2~1 626.5	1.28	3.9	92	0.86	68.0	31	92	59	1 622.2~1 623.7	1 622.2~1 624.2	1 622.2~1 624.6	1 622.2~1 623.7
N6	1 626.5~1 630.7	1.33	4.1	91	0.80	72.0	26	91	58	1 626.5~1 629.3	1 627.4~1 630.7	1 626.7~1 629.3	1 627.4~1 629.3
N7	1 630.7~1 635.2	1.35	4.0	92	0.79	71.0	28	93	65	1 632.1~1 635.2	1 630.7~1 634.3	1 632.6~1 634.4	1 632.6~1 634.3
N8	1 635.2~1 639.3	1.20	3.9	89	0.76	76.0	22	91	63	1 635.2~1 639.3	1 636.9~1 637.8		
N9	1 639.3~1 641.9	1.10	3.2	88	0.82	72.0	26	85	62	1 639.3~1 641.9	1 639.3~1 640.6		
N10	1 651.5~1 656.4	1.10	3.8	87	0.83	65.0	34	82	62	1 651.5~1 656.4	1 651.9~1 656.7	1 651.5~1 654.3	1 651.9~1 654.1
N11	1 651.5~1 662.7	0.90	3.1	90	0.66	48.0	50	84	57				

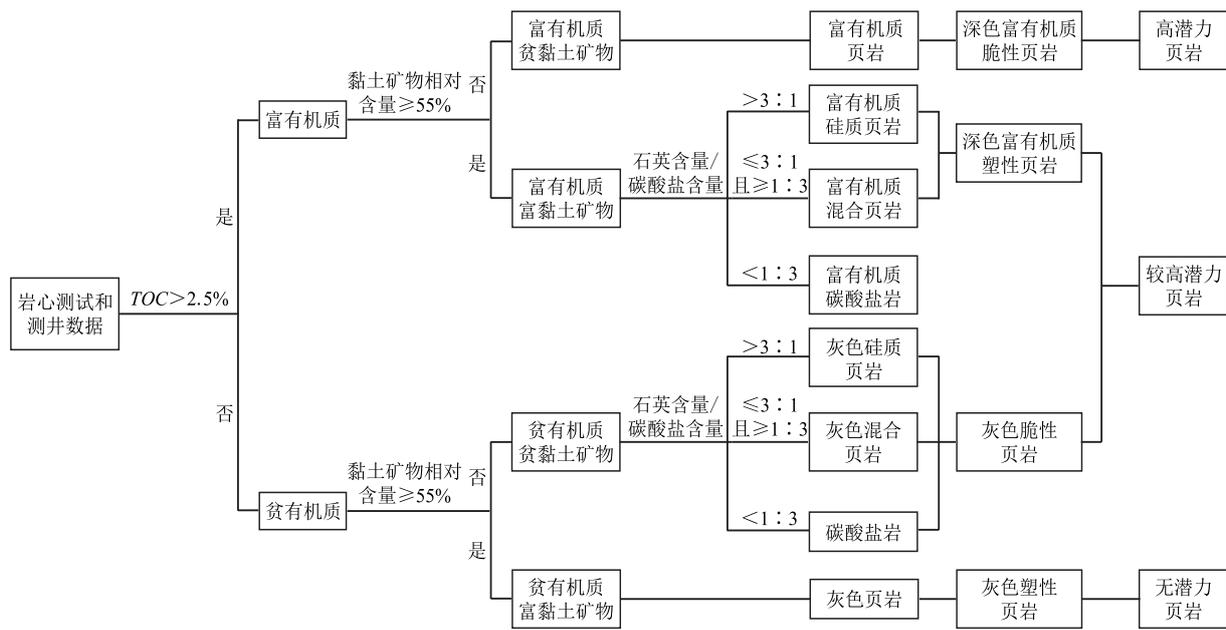


图4 页岩岩相法评价流程(据文献[37-38]修改)

Fig.4 Flowchart of shale petrographic analysis(Modified from References[37-38])

1%,有利于压裂,但有机质丰度低,生烃潜力低,因此储气潜力一般。灰色塑性页岩的黏土矿物含量大于55%,TOC值小于1%,有机质丰度低,黏土矿物含量高,孔隙度和渗透率低,页岩气勘探潜力低,勘探开发时应尽量避免钻遇该类型^[37-38]。例如研究区延页12井长七段N1—N11层页岩,基于上述岩相学分类标准对该井进行岩相学分类,其中,N2—N10层因TOC值高、黏土矿物含量低被划分为深色富有机质脆性页岩,即为高储气潜力层段(表2)。

3.2 五项指标法评价

笔者采用五项指标法来评价生气潜力和开发潜力。五项指标法是利用页岩气的各项发育特征参数,如TOC、 R_o 和吸附气比例等指标构建五项星状图,进而判定其生气或储气潜力。只有当样品的五项指标同时等于或大于标准值时,才表明该页岩达标,具备形成工业化页岩气藏的潜力;如果其中任一项指标不达标(即低于标准),则表明该页岩勘探潜力有限,为无潜力层段^[43]。

3.2.1 生气潜力

页岩气勘探潜力评价首先需确定其生气潜力,具备生气潜力的页岩是勘探开发的前提,即具备形成天然气条件、且已形成天然气的页岩,其中赋存的天然气才能被开发利用。对于不具备生气潜力,达不到生气条件的页岩,即使其物性再好、页岩厚度再大、可压裂性再好,也不具备页岩气勘探的条件。因此,页岩生气潜力评价是页岩气勘探潜力评价的先决条件和首要任务^[42]。

基于鄂尔多斯盆地东南部实际情况,结合中国陆相页岩气指标选取标准,确定生气潜力五项指标为吸附气比例、有机质转化率、气体干燥系数、TOC和 R_o ,进而绘制延长组页岩五项指标星状图(图5)。与其他中国陆相页岩相比,研究区长七段页岩 R_o 值相对较低,而其中有机质转化率、气体干燥系数等指示热演化程度的指标相对较高,吸附气比例相差较小(图5a)。综合分析中国主要含油气盆地陆相页岩发育特征,认为研究区长七段页岩气生气潜力指标的标准为:TOC值大于2.5%, R_o 值大于1.0%,吸附气比例大于55%,有机质转化率大于65%,气体干燥系数大于70%。由图4可以看出,研究区大部分长七段页岩样品的投影点均落于标准阴影区之外,表明其延长组页岩的热演化程度较高,具有较好的生气潜力。

将研究区长七段N1—N11层页岩样品进行分层统计,计算各层的五项指标平均值,分别投影至星状图中,观察各层样品五项指标是否均同时达到标准值。结果(图5b,表2)表明,N1,N3,N5—N10共8层均为高生气潜力层段。

3.2.2 开发潜力

作为一种非常规资源,页岩储层通常具有极低的孔隙度和渗透率,在没有自然裂缝或人工压裂的情况下难以开发利用^[35]。从工业开发的角度来看,水力压裂增产措施是页岩气开发不可缺少的技术,而水力压裂效果受储层性质影响。因此,评价页岩储层的勘探潜力,需对其可压裂开发潜力进行评价。

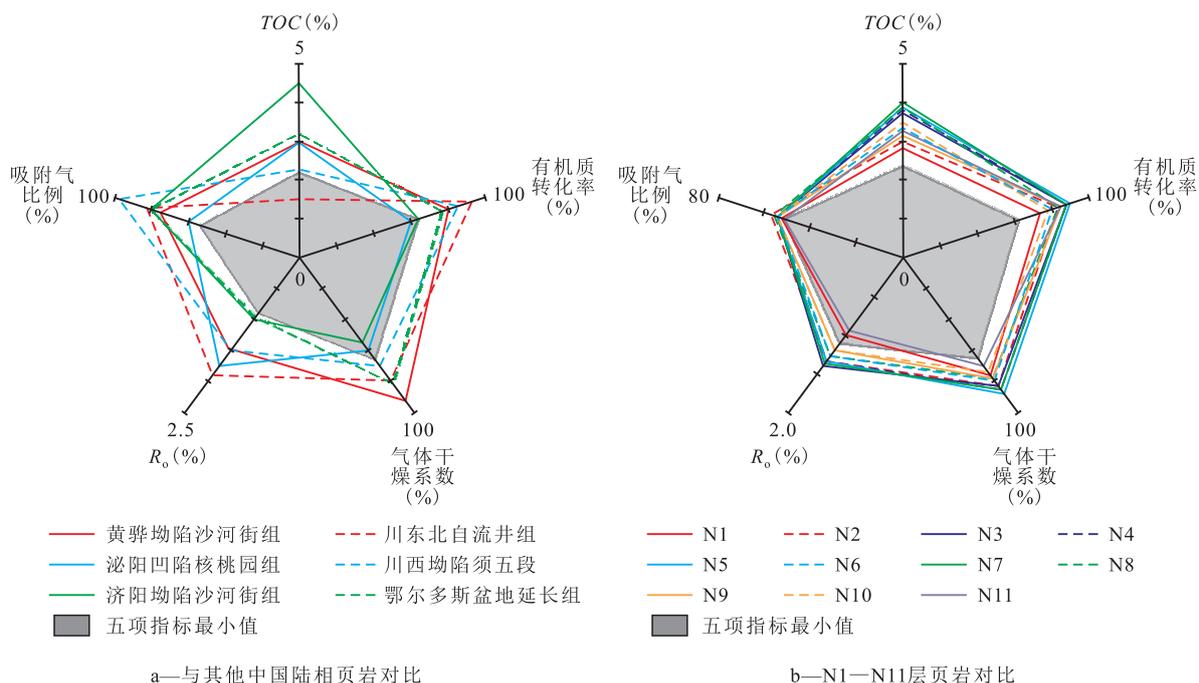


图5 延页12井长七段页岩生气潜力五项指标对比

Fig.5 Five-index method for evaluating gas generation potential of shale in Well YY12 of Chang7 Member

开发潜力的五项指标更多地借鉴北美页岩气勘探成果。页岩开发潜力受多种因素影响,选取页岩的厚度、脆性矿物含量、地层压力系数、*TOC*和 R_o 五项指标构成星状图,确定指标标准阴影区(图6a),进行页岩开发潜力评价。其中,页岩的厚度决定其生烃能力,影响页岩气的经济效益,是页岩气勘探评价的重要指标;页岩中的石英、长石和碳酸

盐等脆性矿物含量与可压裂性相关,脆性矿物含量高,有利于水力压裂及后期改造;*TOC*值控制页岩气的生成和赋存状态,与页岩气含量也有密切关系;成熟度是控制页岩产气能力和产物组成的重要因素。

结合北美页岩气勘探开发成果和中国主要陆相页岩发育特征,认为页岩开发潜力指标标准为:

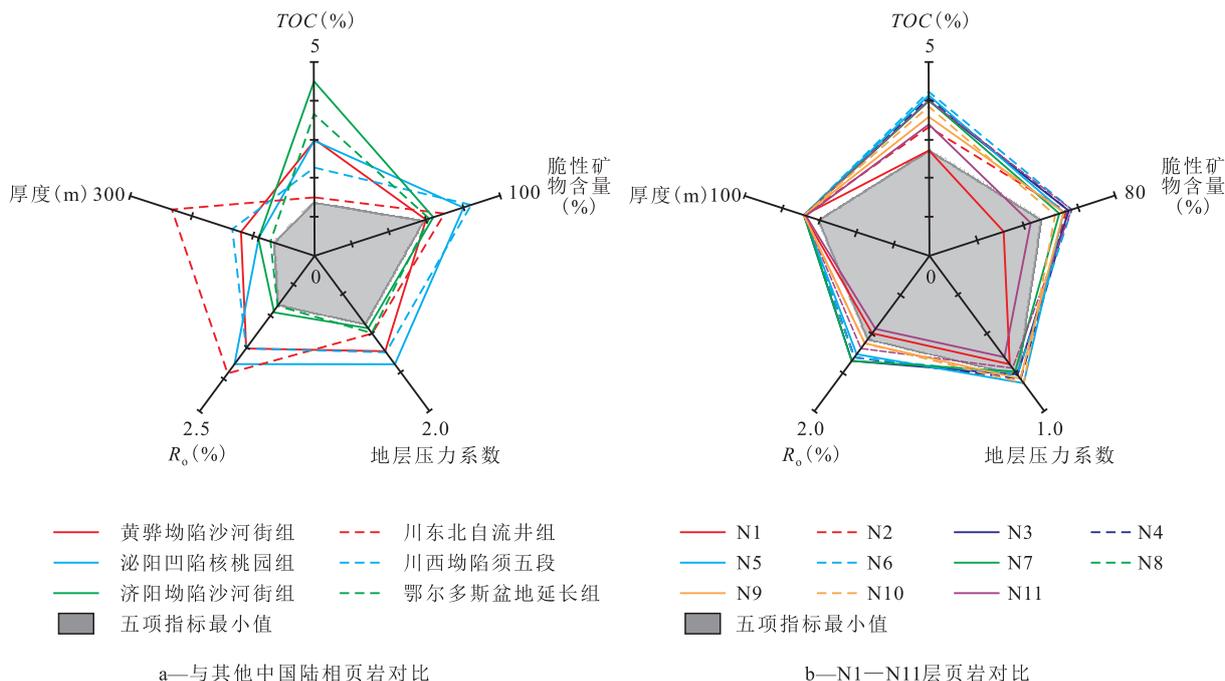


图6 延页12井长七段页岩开发潜力五项指标对比

Fig.6 Five-index method for evaluating development potential of shale in Well YY12 of Chang7 Member

TOC值大于2.5%, R_o 值大于1.0%,厚度大于55 m,地层压力系数大于0.8,脆性矿物含量大于55%。由图5a可以看出,研究区延长组页岩与中国其他陆相页岩的五项指标星状图具有明显差别,除TOC和地层压力系数相对较高之外,其余三项指标均小于中国其他陆相页岩的平均值^[44-48]。与生气潜力分层评价类似,将研究区长七段N1—N11层样品分层统计,计算各层五项指标平均值,分别投影至星状图中。结果(图6b,表2)表明,N2—N7,N9—N10共9层页岩样品的开发潜力达标,均为高开发潜力层段。

3.3 综合潜力评价

采用五项指标法和岩相法对页岩的生气性、储气性和易开采性3个方面进行勘探潜力评价,获得结果具有一定的差异性。五项指标法更趋向于研究区内参数平均值的筛选,而岩相法剔除了厚度的影响因素,着重针对精细层位的勘探潜力评价。综合来看,五项指标法和岩相法共同评价出的最有利层段是通过各项参数评价出的利于生气、储气、易于开采的页岩层段。将2种方法所得出的有利层段

进行叠加,优选出最终的高勘探潜力层段。综合2种方法的各项评价标准,要求高勘探潜力层段需达到各项指标标准,而其余未达到标准的层段皆为低勘探潜力层段(表2,图7)。其中,N3(埋深为1 615.8~1 617.9 m)、N5(埋深为1 622.2 m~1 623.7 m)、N6(埋深为1 627.4~1 629.3 m)、N7(埋深为1 632.6~1 634.3 m)和N10(埋深为1 651.9~1 654.1 m)层评价为高勘探潜力层段。自2011年中国石油在研究区内针对长七段进行勘探开发,攻克了一批“卡脖子”技术难题,形成了适用于页岩油气的勘探开发配套技术,其中N3和N7层被列为开发重点层。2019年这2个重点层新增探明石油地质储量为 3.58×10^8 t、预测石油地质储量为 6.93×10^8 t,目前正在建设百万吨级页岩气开发示范区。由此可以看出,本次研究所采用的勘探潜力评价方法具有很强的科学性和合理性,可以从生气性、储气性和易开采性等方面较为全面地反映出页岩气的勘探潜力,该方法可以在其他区域的页岩气勘探潜力评价中推广应用。研究区页岩评价结果也显示,N5

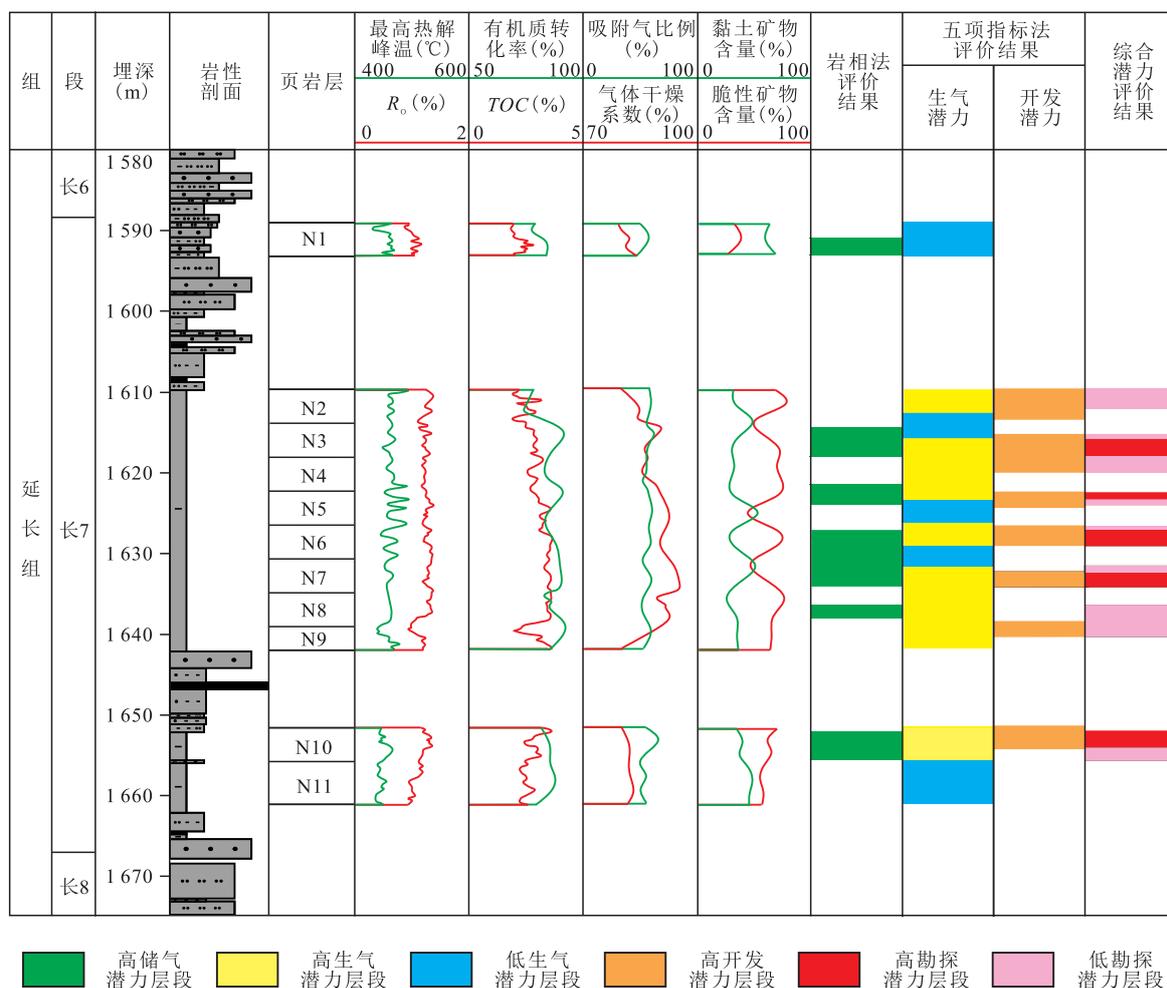


图7 延页12井延长组页岩勘探潜力评价结果

Fig.7 Five-index method for evaluating exploration potential of shale in Well YY12 of Chang7 Member

(埋深为1 622.2~1 623.7 m)、N6(埋深为1 627.4~1 629.3 m)、N10(埋深为1 651.9~1 654.1 m)层可能为未来研究区页岩气取得突破的重点层,应引起重视。

4 结论

鄂尔多斯盆地东南部长七段页岩主要矿物为黏土矿物、石英、长石及少量碳酸盐和黄铁矿,其矿物组成具有较强的差异性。有机地化分析结果显示,研究区页岩的有机质类型以 II_1 型(偏腐泥型)干酪根为主,TOC值为1.76%~5.88%,最高热解峰温为349~459℃,降解率为5.5%~42%, R_o 值为0.5%~1.5%。储层孔隙度的变化范围较大,为0.5%~3.5%,平均为1.82%;渗透率为0.005 1~6.0 mD,平均为0.163 mD,属于低孔低渗透储层。

笔者提出一种多角度多参数综合评价页岩气勘探潜力的方法。在有机地化、矿物组成及储层特征分析的基础上,综合采用岩相法和五项指标法,从生气潜力、储气潜力和开发潜力3个方面进行页岩气勘探潜力评价。岩相法用于评价页岩气储气能力,根据TOC、脆性矿物含量和黏土矿物含量,将页岩划分为深色富有机质脆性页岩、深色富有机质塑性页岩、灰色脆性页岩和灰色塑性页岩4种类型;其中,深色富有机质脆性页岩的勘探潜力最高,为高储气潜力页岩。五项指标法用于评价页岩气生气潜力和开发潜力,分别采用吸附气比例、有机质转化率、气体干燥系数、TOC和 R_o 来评价生气潜力。再通过选取页岩的厚度、脆性矿物含量、地层压力系数、TOC和 R_o 五项指标来判定页岩的开发潜力。将2种方法获得的数据进行叠加,优选出5个最有利的页岩油气勘探层段。最新勘探成果证实,N3和N7层为高产层段,显示出该评价方法的科学性和合理性,应具有重要的推广应用价值。

参考文献

- [1] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会.中国页岩气地质研究进展[M].北京:石油工业出版社,2011.
Editorial Committee of *Shale Gas Geology and E & D Applications Series*.Progress of geologic research of shale gas in China[M].Beijing:Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 王香增.陆相页岩气[M].北京:石油工业出版社,2014.
WANG Xiangzeng.Continental shale gas[M].Beijing:Petroleum Industry Press, 2014.
- [3] 杨超,张金川,唐玄.鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响[J].地学前缘,2013,20(4):240-250.
YANG Chao, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Microscopic pore types and its impact on the storage and permeability of continental shale gas, Ordos Basin[J].Earth Science Frontiers, 2013, 20(4):240-250.
- [4] 姜呈馥,王香增,张丽霞,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J].中国地质,2013,40(6):1 880-1 888.
JIANG Chengfu, WANG Xiangzeng, ZHANG Lixia, et al. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in 7th member of Yanchang Formation, southeast Ordos Basin[J].Geology in China, 2013, 40(6): 1 880-1 888.
- [5] 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.
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.
- [6] 王永炜,高胜利,高潮.鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气勘探[J].地质科技情报,2014,33(6):88-98.
WANG Yongwei, GAO Shengli, GAO Chao. Continental shale gas exploration and discussion on issues related to geological theory in Yanchang exploration area, Ordos basin[J].Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 88-98.
- [7] 程玉群,高胜利,高潮,等.鄂尔多斯盆地延长探区页岩气[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(1):7-12.
CHENG Yuqun, GAO Shengli, GAO Chao, et al. Genesis of shale gas in Yanchang Exploration Areas in Ordos Basin[J].Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2015, 51(1): 7-12.
- [8] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [9] ALEXANDER H, SVEN K, BETTINA B, et al. Applying classical shale gas evaluation concepts to Germany-Part II: Carboniferous in Northeast Germany[J].Geochemistry, 2010, 70(3): 93-106.
- [10] BURNAMAN M, XIA W W, SHELTON J. Shale gas play screening and evaluation criteria [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 51-64.
- [11] UFFMANN A K, LITTKER R, RIPPEN D. Mineralogy and geochemistry of Mississippian and Lower Pennsylvanian black shales at the northern margin of the Variscan Mountain Belt (Germany and Belgium) [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103(12): 92-108.
- [12] 杨华,窦伟坦,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J].沉积学报,2010,28(2):254-263.
YANG Hua, DOU Weitan, LIU Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang formation of Triassic in Ordos Basin[J].Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254-263.
- [13] 王健,石万忠,舒志国,等.富有机质页岩TOC含量的地球物理定量预测[J].石油地球物理勘探,2016,51(3):596-604.
WANG Jian, SHI Wanzhong, SHU Zhiguo, et al. TOC content quantitative prediction in organic-rich shale [J]. Oil Geophysical

- Prospecting, 2016, 51(3): 596-604.
- [14] 周翔, 何生, 刘萍, 等. 鄂尔多斯盆地家坪地区长6致密油储层孔隙结构特征及分类评价[J]. 地质前缘, 2016, 23(3): 253-265.
ZHOU Xiang, HE Sheng, LIU Ping, et al. Characteristics and classification of tight oil pore structure in reservoir Chang6 of Daijiaping area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 253-265.
- [15] 王超, 石万忠, 张晓明, 等. 页岩储层裂缝系统综合评价及其对页岩气渗流和聚集的影响[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 50-56.
WANG Chao, SHI Wanzhong, ZHANG Xiaoming, et al. Comprehensive evaluation of fracture system in shale reservoir and its influence on shale gas seepage and accumulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 50-56.
- [16] 周翔, 何生, 陈召佑, 等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组8段低孔渗砂岩成岩作用及成岩相[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 155-164.
ZHOU Xiang, HE Sheng, CHEN Zhaoyou, et al. Diagenesis and diagenetic facies of low porosity and permeability sandstone in Member8 of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 155-164.
- [17] 张哲豪, 魏新善, 弓虎军, 等. 鄂尔多斯盆地定边油田长7致密砂岩储层成岩作用及孔隙演化规律[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 43-52.
ZHANG Zhehao, WEI Xinshan, GONG Hujun, et al. Diagenesis characteristics and evolution of porosity of Chang7 tight sandstone reservoir in Dingbian Oilfield, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 43-52.
- [18] 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.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [19] 王香增, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部长7陆相泥页岩生烃过程研究[J]. 非常规油气, 2014, 1(1): 2-10.
WANG Xiangzeng, GAO Chao. The hydrocarbon generation process of the Mesozoic Chang7 lacustrine shale in south of Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(1): 2-10.
- [20] 刘猛, 刘超, 舒志恒, 等. 四川盆地涪陵焦石坝地区黑色页岩非均质性特征及控制因素[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 118-125.
LIU Meng, LIU Chao, SHU Zhiheng, et al. Heterogeneity characteristics and controlling factors of black shale in Jiaoshiba, Fuling, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 118-125.
- [21] 解习农, 郝芳, 陆永潮, 等. 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1 045-1 056.
XIE Xinong, HAO Fang, LU Yongchao, et al. Differential enrichment mechanism and key technology of shale gas in complex areas of south China [J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1 045-1 056.
- [22] 张晓明, 石万忠, 徐清海, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 926-939, 953.
ZHANG Xiaoming, SHI Wanzhong, XU Qinghai, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of shale gas in Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 926-939, 953.
- [23] 史森, 于炳松, 薛志鹏, 等. 黔西北地区龙马溪组页岩气储层孔隙特征及其储气意义[J]. 地质前缘, 2016, 23(1): 206-217.
SHI Miao, YU Bingsong, XUE Zhipeng, et al. Pore characteristics and significance of the Longmaxi Formation shale gas reservoirs in northwestern Guizhou, China [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 206-217.
- [24] 何建华, 丁文龙, 李瑞娜, 等. 黄骅坳陷中区和北区沙河街组陆相页岩气形成条件及资源潜力[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 22-30.
HE Jianhua, DING Wenlong, LI Ruina, et al. Forming condition of the continental shale gas of Shahejie Formation in the central-north Huanghua depression and its resource prospect [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 22-30.
- [25] 时战楠, 蒲秀刚, 韩文中, 等. 黄骅坳陷南地区中下侏罗统储层特征及成藏组合模式[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 758-770.
SHI Zhannan, PU Xiugang, HAN Wenzhong, et al. Characteristics and accumulation models of Middle and Lower Jurassic reservoirs in Kongnan area, Huanghua depression [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 758-770.
- [26] 蒲秀刚, 时战楠, 韩文中, 等. 陆相湖盆细粒沉积区页岩层系石油地质特征与油气发现——以黄骅坳陷沧东凹陷孔二段为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 46-58.
PU Xiugang, SHI Zhannan, HAN Wenzhong, et al. Petroleum geological characteristics and hydrocarbon discovery of shale system in fine-grained sedimentary area of lacustrine basin: A case study of Kong2 Member in Cangdong Sag, Huanghua Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 46-58.
- [27] 陈祥, 严永新, 章新文, 等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 137-141, 147.
CHEN Xiang, YAN Yongxin, ZHANG Xinwen, et al. Generation conditions of continental shale gas in Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2): 137-141, 147.
- [28] 姜涛, 金之钧, 刘光祥, 等. 四川盆地元坝地区自流井组页岩储层孔隙结构特征[J/OL]. 石油与天然气地质, 1-18 [2020-09-01]. <http://202.114.202.219: 80/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.4820.TE. 20191218.1425.002.html>.
JIANG Tao, JIN Zhijun, LIU Guangxiang, et al. Pore structure characteristics of shale reservoirs in Ziliujing formation of Yuanba area, Sichuan basin [J]. Oil & Gas Geology, 1-18 [2020-09-01]. <http://202.114.202.219: 80/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.4820.TE. 20191218.1425.002.html>.
- [29] 张碧璇. 川西坳陷陆相页岩层系含气性特征及主控因素[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
ZHANG Bixuan. Gas bearing characteristics and main controlling factors of continental shale sequence in western Sichuan depres-

- sion[D].Beijing:China University of Petroleum(Beijing),2018.
- [30] 潘仁芳,陈美玲,张超谟,等.济阳拗陷古近系沙河街组页岩有机质热演化特征[J].地学前缘,2016,23(4):277-283.
PAN Renfang, CHEN Meiling, ZHANG Chaomo, et al.Characteristics of shale organic matter thermal evolution in Paleogene Shahejie formation in Jiyang depression[J].Earth Science Frontiers, 2016,23(4):277-283.
- [31] 宋明水,李友强.济阳拗陷油气精细勘探评价及实践[J].中国石油勘探,2020,25(1):93-101.
SONG Mingshui, LI Youqiang.Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang depression[J].China Petroleum Exploration, 2020,25(1):93-101.
- [32] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳拗陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例[J].石油学报,2013,34(1):83-91.
WANG Yongshi, LI Zheng, GONG Jianqiang, et al.Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: a case study on Luojia area in Zhanhua sag[J].Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):83-91.
- [33] MONTGOMERY S L, JARVIE D M, BOWKER K A, et al.Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J].AAPG Bulletin, 2005,89(2):155-175.
- [34] 任克雄,侯宇光,何生,等.漠河盆地上侏罗统额尔齐斯组陆相泥页岩孔隙结构特征[J].地质科技情报,2016,35(5):66-76.
REN Kexiong, HOU Yuguang, HE Sheng, et al.Pore structure characteristics of Upper Jurassic Emuerhe formation continental shale in Mohe basin[J].Geological Science and Technology Information, 2016,35(5):66-76.
- [35] ROSS D J K, BUSTIN R M.Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J].AAPG Bulletin, 2008,92(1):87-125.
- [36] 杨振恒,李志明,沈宝剑,等.页岩气成藏条件及我国黔南拗陷页岩气勘探前景浅析[J].中国石油勘探,2009,14(3):24-28.
YANG Zhenheng, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al.Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in southern Guizhou Depression[J].China Petroleum Exploration, 2009,14(3):24-28.
- [37] WANG Guochang, CARR T R.Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction: A case study from Marcellus Shale in the Appalachian basin[J].Computers & Geosciences, 2012,49(4):151-163.
- [38] WANG Guochang, JU Y, CARR T R, et al.The hierarchical decomposition method and its application in recognizing Marcellus Shale lithofacies through combining with neural network[J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015,127(2):469-481.
- [39] 侯宇光,何生,易积正,等.页岩孔隙结构对甲烷吸附能力的影响[J].石油勘探与开发,2014,41(2):248-256.
HOU Yuguang, HE Sheng, YI Jizheng, et al.Effect of pore structure on methane sorption capacity of shales[J].Petroleum Exploration and Development, 2014,41(2):248-256.
- [40] 李延钧,刘欢,刘家霞,等.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):28-34.
LI Yanjun, LIU Huan, LIU Jiaxia, et al.Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas[J].Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011,33(2):28-34.
- [41] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J].Natural Gas Industry, 2004,24(7):15-18.
- [42] 马义权,杜学斌,刘惠民,等.东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化[J].地球科学,2017,42(7):195-208.
MA Yiquan, DU Xuebin, LIU Huimin, et al.Characteristics, depositional processes, and evolution of shale lithofacies of the upper submember of Es₄ in the Dongying Depression[J].Earth Science, 2017,42(7):195-208.
- [43] TEICHERT C, SCHOPF J M.A middle or lower Devonian psilophyte flora from central Arizona and its paleogeographic significance[J].The Journal of Geology, 1958,66(2):208-217.
- [44] 王宁.鄂尔多斯盆地寺湾地区山西组泥页岩有机地球化学特征及生烃潜力评价[D].西安:长安大学,2016.
WANG Ning.Study on the geochemical character and hydrocarbon generation potential of Shanxi Formation in Xiasiwang area, Ordos Basin[D].Xi'an:Chang'an University, 2016.
- [45] 罗鹏,吉利明.陆相页岩气储层特征与潜力评价[J].天然气地球科学,2013,24(5):1060-1068.
LUO Peng, JI Liming.Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas[J].Natural Gas Geoscience, 2013,24(5):1060-1068.
- [46] 白国平,邱海华,邓舟舟,等.美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J].石油实验地质,2020,42(4):524-532.
BAI Guoping, QIU Haihua, DENG Zhouzhou, et al.Distribution and main controls for shale oil resources in USA [J].Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):524-532.
- [47] 左如斯,杨威,王乾右,等.川西拗陷须家河组陆相页岩岩相控制下的微观储集特征[J].特种油气藏,2019,26(6):22-28.
ZUO Rusi, YANG Wei, WANG Qianyou, et al.Lithofacies-control microscopic reservoir characterization of the continental shale in the Xujiahe formation of western Sichuan depression [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2019,26(6):22-28.
- [48] 胡明,房金伟,赵佳丽,等.歧口凹陷马东地区深层油气藏特征及成藏主控因素[J].大庆石油地质与开发,2019,38(6):32-39.
HU Ming, FANG Jinwei, ZHAO Jiali, et al.Characteristics and main accumulation controlling factors for deep hydrocarbon reservoirs in Madong area of Qikou Sag [J].Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2019,38(6):32-39.