

东濮凹陷北部沙三中亚段页岩油成藏地质条件与有利区优选

张 鹏¹, 张金川², 刘 鸿¹, 黄宇琪¹

(1. 六盘水师范学院 矿业工程系, 贵州 六盘水 553004;

(2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083)

摘 要:东濮凹陷北部页岩油勘探处于起步阶段,沙三中亚段为研究的重点层位,从泥页岩空间展布、有机地球化学、储层特征以及含油性等方面,研究页岩油的富集条件,并对目标层系进行有利区优选。结果表明:研究区深湖—半深湖相页岩厚度较大,三角洲相中砂岩夹层较多;沙三中亚段有机质类型以Ⅱ₁和Ⅱ₂型为主,总有机碳含量均值 0.84%,镜质体反射率 0.8%~1.5%,有机质处于成熟—高成熟阶段;沙三中亚段页岩矿物组成中脆性矿物含量大于 50%,孔隙类型主要有粒间孔、晶间孔、次生溶蚀孔及微裂缝,有机质孔较少;分别运用氯仿沥青“A”法、热解法以及含油饱和度理论计算法,得出含油率为 0.242%、0.266%和 0.228%;认为勘探有利区受沉积相控制,I类有利区主要位于濮城—文留湖相沉积地区。

关键词:东濮凹陷北部;沙三中亚段;页岩油;地球化学特征;含油性;有利区

中图分类号: TE122

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)03-0001-07

Geological Conditions for Accumulation and Favorable Area Selection of Shale Oil in Mid-submember of Es3 Formation, Northern Dongpu Depression

ZHANG Peng¹, ZHANG Jinchuan², LIU Hong¹, HUANG Yuqi¹

(1. Department of Mining Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The exploration of the shale oil in the northern part of Dongpu depression is in the early stage and the mid-submember of Es3 formation is the focused research horizon. The paper studied the shale oil enrichment conditions from the aspects of the spatial distribution, organic geochemistry, reservoir characteristics and oiliness of shale. The results show that the shale in deep and semi-deep lacustrine facies of the mid-submember of Es3 in the northern part of Dongpu depression is of great thickness, but there are a lot of sandstone interlays in the shale of the delta facies. With Ⅱ₁ and Ⅱ₂ as the main organic matter types, 0.84% of the average TOC and 0.8%~1.5% of vitrinite reflectance, the organic matter in the mid-submember of Es3 in the northern part of Dongpu depression has reached the stage of maturation-high maturation. Over 50% of the shale mineral in the mid-submember of Es3 is brittle mineral and with intergranular pores, intercrystal pores, secondary dissolution pores, and microfracture as its main types of reservoir pores, few organic pores are found there. The respective oil content of shale is 0.242%, 0.266% and 0.228%, calculated with the chloroform bitumen “A” method, pyrolysis method, and oil saturation method. The favorable target areas for shale oil exploration are controlled by sedimentary facies and the type I favorable areas are mostly located in Pucheng-Wenliu lacustrine deposit area.

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 贵州省煤炭绿色开采及矿区生态环境保护科技创新人才团队项目(黔科通(2013)93号)

作者简介: 张 鹏(1986—),男,山东济南人,副教授,博士,主要从事页岩油气的研究工作. E-mail: zhangpeng8611@126.com

Key words: northern Dongpu depression; mid-submember of Es3; shale oil; organic geochemistry characteristics; oiliness; favorable areas

东濮凹陷北部地区沙三段泥页岩段频繁见到气测异常和油气显示。濮深 18-1 井沙三上亚段泥页岩段获得日产油 420 t 高产油流,取得我国陆相页岩油勘探突破,表明东濮凹陷具备形成泥页岩油气的条件和勘探潜力^[1-2]。页岩油与常规油气在赋存状态、富集层段、储集特征、成藏机理、可采条件及开发技术等方面差异显著。因此,对东濮凹陷北部地区沙三段开展泥页岩油气储集性能及烃类赋存特征研究,探索陆相泥页岩成藏机理,开展东濮凹陷北部地区沙三段页岩油可采性研究,优选页岩油发育目标区,可开拓东濮凹陷油气接替新领域,为形成非常规油气勘探理论和技术奠定重要基础^[3-4]。

1 区域地质概况

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南端,东侧以兰聊断裂为界与鲁西隆起为邻,西侧以石家集、长垣等断裂为界与内黄隆起相接,南以封丘北断层为界与兰考凸起相邻,北以马陵断层为界与莘县凹陷相望,具有“两洼一隆一陡一斜坡”的构造特征。东濮凹陷构造展布及演化规律在海通集—桥口—白庙一线南北两侧差异较大,呈北部岩盐沉积发育而南部不发育的南北分块沉积格局。东濮凹陷北部地区沙三段为湖相背景下的三角洲前缘沉积(图 1),半深湖—深湖相深灰色泥岩、黑色页岩分布于前梨园、濮城、卫城地区,文留地区为典型盐湖环境,垂向上岩盐和泥页岩呈频繁韵律互层分布。三角洲体系发育单层厚度小、砂泥频繁互层的暗色泥页岩,主要分布于凹陷边缘^[5]。

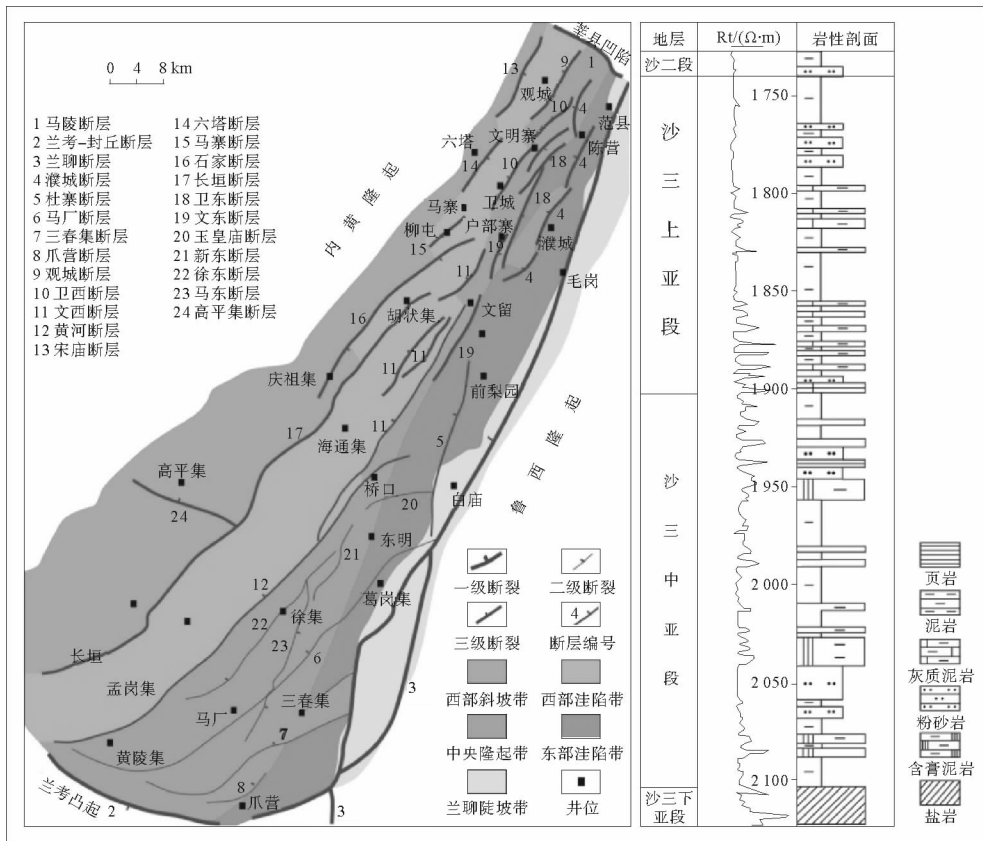


图 1 研究区构造分区及岩性特征

Fig. 1 Tectonic and lithology characteristics of the research area

2 页岩油富集地质条件

2.1 页岩空间展布特征

沙三中亚段研究区处于湖盆扩张阶段,泥页岩厚度大,分布范围广,研究区中部胡状集和前梨园附近区域最大厚度达 400 m,北部小部分地区厚度小于 50 m。呈中部厚度最大,向南北两侧减薄的趋势,厚度变化受沉积相影响。

湖泊体系泥页岩厚度大,垂向分布连续,砂岩夹层较少,其中盐湖相发育范围内盐岩大量发育,主要发育于沙三中亚段上部。三角洲沉积体系中前三角洲泥及水下分流间湾两个微相泥页岩发育,泥页岩垂向连续性较差,单层厚度相对较小,砂岩夹层多,泥页岩中粉砂质含量高。

2.2 页岩有机地化特征

泥页岩作为页岩油的主要烃源岩,其地球化学指标与常规烃源岩相同,泥页岩的生烃潜力是各项地化参数综合作用的结果,因此,有机地球化学参数是页岩油资源潜力评价的基础^[6-8]。

泥页岩有机质类型是评价的重要参数之一,不同类型有机质生烃潜力及产物均有差别。通过干酪根镜鉴、岩石热解等实验及干酪根类型指数计算^[6-7],对研究区沙三中亚段泥页岩有机质类型进行分析。结果表明,研究区沙三中亚段有机质类型以 II₁ 和 II₂ 型为主,有利于页岩油的生成。有机质丰度是页岩油工业聚集的油源物质基础,与泥页岩含油率有直接关系,因此有机质丰度是资源潜力评价的一项极为重要指标。有机质丰度的常见评价参数有:残余总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”含量、总烃含量、生烃潜能(S1+S2)等。沙三中亚段 TOC 值主要分布在 0~0.5%和 0.5%~1.0%两个区间,均值 0.84%;氯仿沥青“A”值分布在大于 0.2 mg/g 的区间,均值 0.18 mg/g;通过上述分析认为,沙三中亚段的生烃潜力较好。东濮凹陷北部沙三中亚段泥页岩样品中有机质成熟度 0.8%~1.5%,均值 1.07%,说明研究区有机质主体处于成熟-高成熟阶段,结合有机质类型研究结果,认为大部分有机质处于生油高峰期(图 2)。

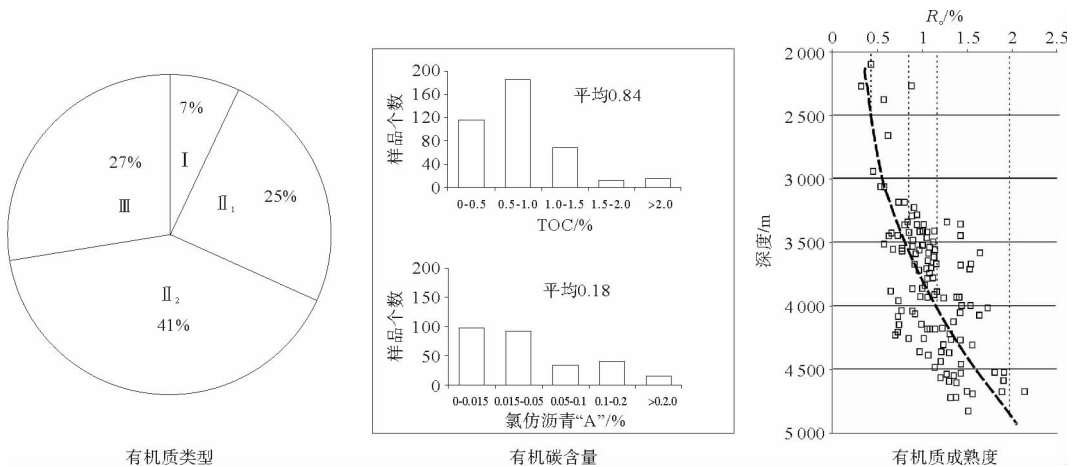


图 2 东濮凹陷北部沙三中亚段页岩地球化学特征

Fig. 2 Organic geochemistry characteristics of shale in mid-submember of Es3 of northern Dongpu depression

2.3 泥页岩储层特征

1) 岩性及矿物学特征

东濮凹陷北部沙三中亚段泥页岩类型包括普通泥岩、灰质泥岩、云质泥岩、膏质泥岩及粉砂质泥岩等,普通泥岩发育范围广,多为块状,部分发育页理;灰质泥岩发育于水深较大的湖盆中心处,部分发育纹层;云质泥岩多发育于滨浅湖等湖盆边缘过渡带;膏质泥岩常与盐岩伴生,多见于盐湖地区,发育纹层,但多被石膏充填;粉砂质泥岩在三角洲沉积体系中较为常见。

研究区沙三中亚段泥页岩矿物成分主要由石英、长石、碳酸盐岩、石膏及粘土矿物组成(图 3),湖相泥页岩

岩中粘土矿物含量达 45%，明显高于三角洲相泥页岩，石英含量则明显偏小，约为 20%，矿物组成比例与三角洲相泥页岩有明显区别；三角洲沉积体系中前三角洲及三角洲前缘亚相中泥页岩矿物组成特征相似。研究区沙中亚段泥页岩脆性矿物含量较高，大部分达 50%，有利于勘探开发过程中后期储层改造。

2) 储集空间类型及孔渗特征

页岩油储层孔隙结构复杂、储集空间类型多样，具有储集流体和提供流动空间的双重作用。通过对泥页岩岩芯样品的普通扫描电镜及氩离子抛光照片观察(图 4)，根据泥页岩储集空间成因、结构及物性特征将样品储集空间进行分类(表 1)。对孔隙大小的表征采用基于场发射扫描电镜观察的微观孔隙二分法^[8-10]：1 mm~1 μm 为微米级孔隙，小于 1 μm 为纳米级孔隙。泥页岩为低孔低渗储层，研究区泥页岩样品平均孔隙度 3.7%，平均渗透率 $0.0913 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，统计发现孔隙度、渗透率为异常高值，推测与泥页岩样品中发育微裂缝有关。

2.4 泥页岩含油性特征

页岩含油量指每吨页岩中含页岩油折算到标准温度和压力条件下(101.325 kPa, 25 °C)的百分含量，既包括原始条件下的液态原油，还包括溶解在天然气中的凝析油，而含油率是表征页岩含油性最直观最关键的参数。由于泥页岩含油率较难获得，以往研究中常用氯仿沥青“A”含量近似代替含油率^[11-13]。虽然这种替代方法具有一定合理性，但泥页岩含油率还受到其他因素影响，直接替代的方法误差较大。因此，本研究尝试多种方法获取泥页岩含油率，尽可能减小误差^[14-15]。

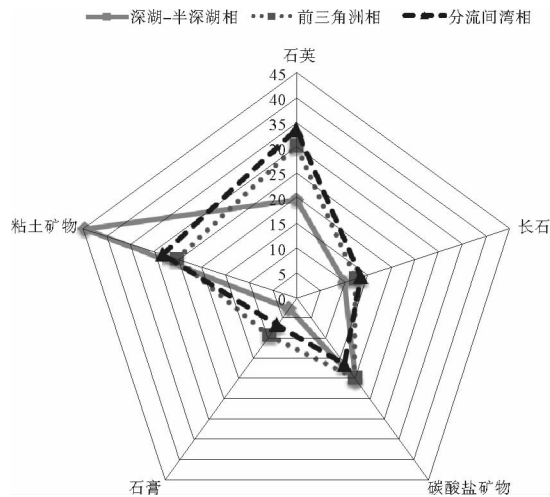
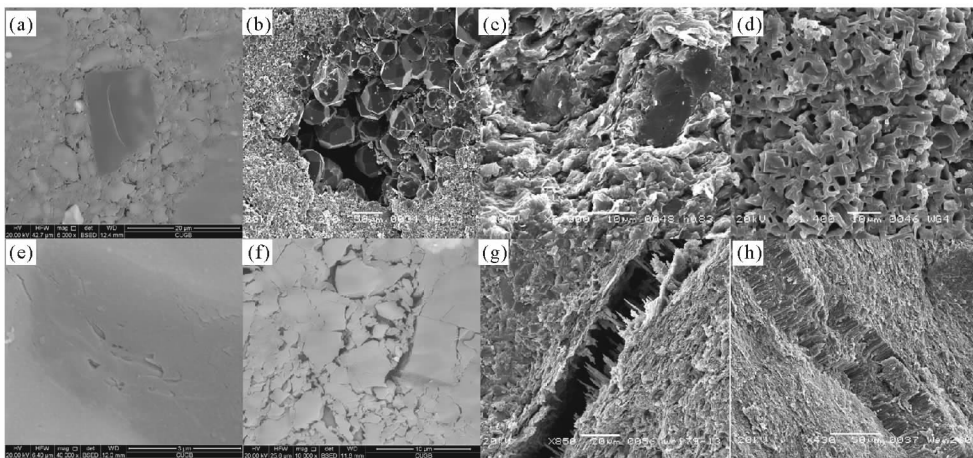


图 3 不同沉积环境泥页岩矿物组成特征比较

Fig. 3 Mineral compositions of shale in different sedimentary facies



(a)濮 148 井, 粒间孔发育; (b)卫 63 井, 黄铁矿晶间孔发育; (c)胡 83 井, 粘土矿物晶间孔及矿物颗粒表面溶蚀孔发育; (d)文古 4 井, 石盐晶体核心被溶蚀呈骨骸状, 次生溶蚀微孔隙发育; (e)文 260 井, 有机质孔; (f)文 88~1 井, 微裂缝及粒间孔发育; (g)卫 79~13 井, 裂缝发育, 裂缝中生长针状方解石晶体, 部分被充填; (h)文 260 井, 裂缝发育, 被硬石膏晶体完全充填

图 4 东濮凹陷北部沙三段泥页岩典型储集空间类型

Fig. 4 Typical types of shale reservoir space in Es3 formation, northern Dongpu depression

本次研究中岩芯样品存放时间较长, 不适于进行含油率实测, 故采用地化算法中的氯仿沥青“A”法和热解法进行含油率计算(表 1)。

同时采用含油饱和度公式计算法, 对含油率进行理论计算, 得出东濮凹陷北部沙中亚段含油率均值为 0.2276%, 与地化计算法结果相差不大。

$$\text{含油率} = M_{\text{油}} / M_{\text{岩石}} = \rho_{\text{油}} / \rho_{\text{岩石}} \times \Phi \times S_o$$

其中: $M_{\text{油}}$ —岩石中油的质量, g; $M_{\text{岩石}}$ —岩石总质量, g; $\rho_{\text{油}}$ —原油密度, g/cm^3 ; $\rho_{\text{岩石}}$ —岩石密度, g/cm^3 ; Φ —孔隙度, %; S_o —含油饱和度, %。

虽然富有机质泥页岩层系中可能广泛含烃, 但只有地层中含油率达到一定水平并相对富集时才具有工业开发价值。美国页岩工业开发含油率下限为 0.18%, 采用 3 种方法对东濮凹陷北部沙三中亚段泥页岩含油率进行计算, 平均值为 0.245%, 超过该标准具有勘探开发价值及潜力。

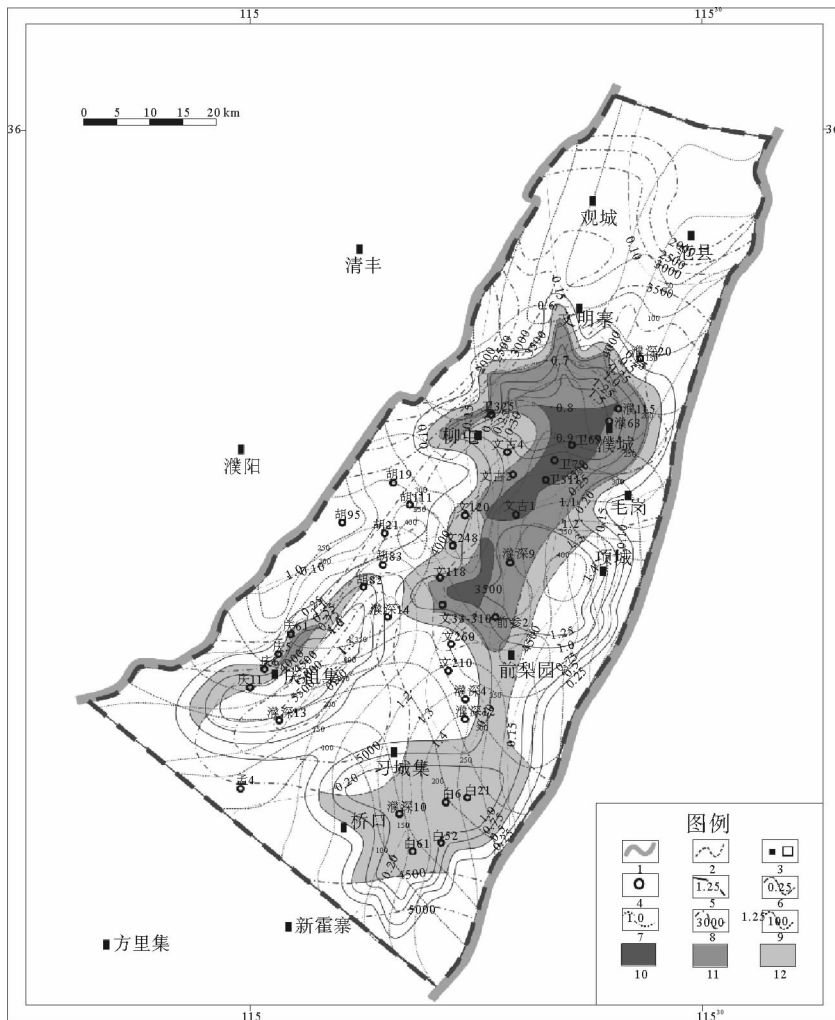
3 页岩油勘探目标区优选

通过对东濮凹陷北部沙三中亚段页岩油所选评价参数综合叠加, 划分出 I 类、II 类及 III 类勘探目标有利区(图 5)。I 类有利区, 主要位于濮城—文留地区, 以深湖一半深湖相及盐湖相沉积为主, 泥页岩厚度大, 有

表 1 地球化学算法含油率计算结果表

Tab. 1 Result of oil content calculated by geochemical parameters

方法	层位	样品数/个	含油率计算结果	
			均值/%	方差
氯仿沥青“A”法	沙三中亚段	42	0.241 9	0.153 4
热解法	沙三中亚段	292	0.265 6	0.098 7



1. 凹陷边界; 2. 研究区边界; 3. 地名; 4. 井位; 5. TOC(%)等值线; 6. 含油率(%)等值线; 7. R_o (%)等值线;
8. 埋深(m)等值线; 9. 泥页岩厚度(m)等值线; 10. I类有利区; 11. II类有利区; 12. III类有利区

图 5 东濮凹陷北部沙三中亚段页岩油有利区

Fig. 5 Favorable areas of shale gas in mid-submember of Es3, northern Dongpu depression

机质丰度较大,含油率较高,且有机质成熟度和埋深适中,有利于页岩油勘探及后期开发;Ⅱ类有利区,以Ⅰ类有利区为标准向周缘地区延伸,南北为前梨园—文明寨一线,东西为柳屯—濮城以东,庆祖集附近也有小范围地区满足Ⅱ类有利区标准,沉积相类型仍以湖相沉积为主,也有部分前三三角洲相发育区域,与Ⅰ类有利区相比,Ⅱ类有利区范围泥页岩埋深略大,成熟度偏低;Ⅲ类有利区基本为湖相沉积分布范围,与Ⅱ类有利区相比,主要增加了习城集、桥口附近区域。

4 结论

东濮凹陷北部沙三中亚段泥页岩厚度较大,湖泊沉积体系中泥页岩夹层少,三角洲沉积体系中粉砂岩夹层发育,有机质类型以Ⅱ₁和Ⅱ₂型为主,总有机碳含量均值0.84%,氯仿沥青“A”均值0.18%,镜质体反射率0.8%~1.5%,有机质处于成熟—高成熟阶段,大部分处于生油高峰。

沙三中亚段泥页岩矿物组合受沉积相影响,脆性矿物含量大于50%,有利于勘探开发过程中后期储层改造,储集空间类型主要有粒间孔、晶间孔、次生溶蚀孔及微裂缝。

综合多种页岩含油率测试及计算方法优缺点,结合本次研究特点,选择氯仿沥青“A”、热解及含油饱和度3种方法计算含油率,平均值为0.245%。

通过参数叠合,划分出研究区沙三中亚段勘探目标有利区:Ⅰ类有利区位于濮城—文留地区,以深湖—半深湖相及盐湖相沉积为主;Ⅱ类有利区以Ⅰ类有利区为标准向周缘地区延伸,南北为前梨园—文明寨一线,东西为柳屯—濮城以东,庆祖集附近也有小范围满足Ⅱ类有利区选区标准;Ⅲ类有利区增加了习城集、桥口附近区域。

参考文献:

- [1]武晓玲,吴鲜,梅丹.东濮凹陷沙三上盐间泥页岩储集空间发育特征[J].中国石油和化工标准与质量,2013(8):173.
WU Xiaoling, WU Xian, MEI Dan. Shale between salts reservoir space characteristics in upper-submember of Es3 in Dongpu depression[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013(8): 173.
- [2]周进松,于兴河,杜海峰,等.东濮凹陷北部古近系沙三中段沉积体系特征及充填模式[J].沉积与特提斯地质,2010,30(3):90-96.
ZHOU Jinsong, YU Xinghe, DU Haifeng, et al. Sedimentary systems and filling models for the middle part of the third member of the Shahejie formation in northern Dongpu depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(3): 90-96.
- [3]杜海峰,于兴河,陈发亮.河南省东濮凹陷古近系沙河街组沙三段盐岩沉积特征及其石油地质意义[J].古地理学报,2008,10(1):53-63.
DU Haifeng, YU Xinghe, CHEN Faliang, et al. Sedimentary characteristics of salt rocks and their petroleum geologic significance of the Member 3 of Shahejie formation of Paleogene in Dongpu sag, Henan province[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 53-63.
- [4]鹿坤,左银辉,梅冰,等.东濮凹陷古沉积环境及其对有机质丰度的影响[J].地质与勘探,2013,49(3):589-594.
LU Kun, ZUO Yinhui, Mei Bing, et al. Paleo-sedimentary environment in the Dongpu depression and their impact on organic matter abundance[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(3): 589-594.
- [5]葛明娜,张金川,毛俊莉,等.辽河拗陷东部凸起上古生界页岩气资源潜力评价[J].天然气工业,2012,32(9):28-32.
GE Mingna, ZHANG Jinchuan, MAO Junli, et al. Evaluation on Neopaleozoic shale gas resource potential in the eastern Salient of the Liaohe depression[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 28-32.
- [6]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,2011,27(6):1857-1864.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bing, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [7]SLATT E M, O'NEAL N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [8]LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and net works in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.

- [9]GALE F J, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [10]张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [11]李硕, 郭和坤, 刘卫, 等. 利用核磁共振技术研究岩心含油饱和度恢复[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(2): 62-65.
LI Shuo, GUO Hekun, Liu Wei, et al. Study on oil saturation recovery on cores by using nuclear magnetic resonance(NMR) [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(2): 62-65.
- [12]SONNENBERG S A, PRAMUDITO A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 127-153.
- [13]MULLEN J, LOWRY J C, NWABUOKUK C. Lessons learned developing the Eagle Ford shale[R]. Proceedings of Tight Gas Completions Conference, Texas, USA, 2010.
- [14]李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.
LI Xinjing, LÜ Zonggang, DONG Dazhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 27-32.
- [15]郭秋麟, 陈宁生, 宋焕琪, 等. 致密油聚集模型与数值模拟探讨: 以鄂尔多斯盆地延长组致密油为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 4-10.
GUO Qiulin Lin, CHEN Ningsheng, SONG Huanqi, et al. Accumulation models and numerical models of tight oil: A case study from Yanchang formation in Ordos basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(1): 4-10.

(责任编辑:高丽华)

“沉积·资源·环境”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇地质基本科学问题、应用及发展
- ◇全球环境变化与沉积作用
- ◇盆地分析与板块运动
- ◇盆地运动学的新理论
- ◇能源的勘探与开发
- ◇大地构造沉积学
- ◇层控矿床
- ◇岩相古地理
- ◇生物成矿作用
- ◇流域开发与环境保护
- ◇层序地层与事件地质
- ◇油气储集层的成岩作用

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“沉积·资源·环境”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表,优稿优酬。

投稿平台: <http://xuebao.sdust.edu.cn>

电子邮箱: zkglhxx@163.com; zkzxcg@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057859

《山东科技大学学报(自然科学版)》编辑部