

## 汶东凹陷页岩油发育特征及富集控制因素分析

刘旭锋,张交东\*,周新桂,曾秋楠

(中国地质调查局 油气资源调查中心,北京 100029)

**摘要:**汶东凹陷为鲁西隆起中—新生界中小型断陷盆地,其泥页岩沉积厚度大、埋藏浅,具有较高页岩油勘探价值。根据中国地质调查局新完钻的汶页1井的钻探资料,分析汶东凹陷大汶口组页岩油发育特征及富集控制因素。汶页1井钻探结果显示,在汶东凹陷沉降中心附近的大汶口组中、上段发育厚度约为500 m的有效烃源岩,主要分布于大汶口组上段和中段上亚段;烃类以页岩油形式聚集,含油率普遍大于1.5%,在埋深为440~560和700~820 m发育2个页岩油富集层段,具有一定的页岩油资源潜力。研究区大汶口组页岩油的富集规律受沉积环境、有机质丰度和裂隙(层理)发育程度等3个主要因素控制。研究表明,深湖—半深湖沉积环境有利于有机质保存,为油气生成提供物质基础;有机质丰度和含油率呈良好正相关关系,决定了研究区大汶口组的生油能力;裂隙(层理)为页岩油提供良好的储集和渗流通道,有利于页岩油的富集成藏。

**关键词:**大汶口组 页岩油 含油率 控制因素 汶东凹陷

中图分类号:TE112.3

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0041-06

## Discussion of development features of shale oil in Wendong sag and its enrichment controlling factors

Liu Xufeng, Zhang Jiaodong, Zhou Xingui, Zeng Qiunan

(Center for Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing City, 100029, China)

**Abstract:** Wendong sag, one of the small Mesozoic-to-Cenozoic lacustrine rift basins locating in the Luxi uplift, deposits thick Paleocene mudrocks with shallow burial depth and high exploration value. Vertically, development features and enrichment factors of shale oil of the Dawenkou Formation within the sag was analyzed on the basis of data of Well Wenye No.1 drilled by China Geological Survey. The drilling results of Well Wenye No.1 show that about 500 m thick of source rock develops at the middle-to-upper member of the Dawenkou Formation near the subsidence center of Wendong sag. Hydrocarbons accumulate in the ways of shale oil with oil content generally greater than 1.5%. Two shale oil-rich intervals having high hydrocarbon generation potential are found at 440-560 m and 700-820 m underground. The level of vertical enrichment for shale oil in this region depends on depositional setting, TOC abundance and development level of fractures (beddings). Evidence shows semi-deep to deep lacustrine setting is favorable for organic matter preservation which provides fundamental material for hydrocarbon generation; the abundance of organic matter has a positive relationship with oil content, which determines the hydrocarbon generation potential; fractures (beddings) provide better porosity and permeability and make the accumulation of oil possible.

**Key words:** Dawenkou Formation; shale oil; oil content; controlling factor; Wendong sag

鲁西隆起中—新生界发育众多小型断陷盆地,沉积巨厚的含膏泥页岩<sup>[1-3]</sup>,但由于盆地面积普遍较小,且缺少构造圈闭,导致其油气资源潜力被低

估。近年来,在国外页岩油气革命和中国对能源需求日益增大的前提条件下,油气勘探目标从常规圈闭转向寻找大面积连续发育的致密储层<sup>[4-6]</sup>。汶东

收稿日期:2016-08-11。

作者简介:刘旭锋(1990—),男,山东东营人,工程师,硕士,从事油气勘探工作。联系电话:17710519604, E-mail: xf-liu23@foxmail.com。

\*通讯作者:张交东(1968—),男,山东潍坊人,教授级高级工程师,博士。联系电话:13691390257, E-mail: 644184823@qq.com。

基金项目:中国地质调查局“南华北盆地油气资源战略调查”(1211302108023-1)。

凹陷古近系大汶口组与渤海湾盆地主力生油岩层古近系沙四段和沙三段具有相似的沉积环境<sup>[7-8]</sup>,故该区应该也具有重要的油气勘探价值。汶东凹陷钻探唯一的1口探井——鲁1井(井深为2 290 m,未钻穿古近系),确定盆地发育巨厚的暗色地层,且在多个层系见到油气显示,揭示出研究区的含油气远景。2015年中国地质调查局在汶东凹陷部署第1口页岩油地质调查井(汶页1井),通过连续取心首次完整揭示研究区沉降中心大汶口组上段和中段及部分下段共计1 500余米。笔者根据汶页1井的钻探资料对汶东凹陷页岩油的发育特征及富集控制因素进行研究,以为研究区页岩油有利发育层段预测及优选提供依据。

### 1 区域地质概况

汶东凹陷位于鲁西隆起,是一个典型的断陷盆地,整体呈北断南超的箕状构造。其北界受徂徕山断裂控制,大汶口组沉积厚度最大;东段被羊流断裂切断后隐伏于羊流店以北,羊流断裂和西部瓷窑断裂分别为凹陷的东、西边界<sup>[9]</sup>(图1)。蒙山断裂将汶东凹陷分为东、西部分,其中油气勘探主要针对断裂发育较少的西部区域。鲁西隆起在加里东末期至喜马拉雅末期经历过几次大规模的构造运动,主要沉积古近系固城组和大汶口组<sup>[10]</sup>。在汶东凹陷沉降中心区域,大汶口组下段沉积厚度为700 m,

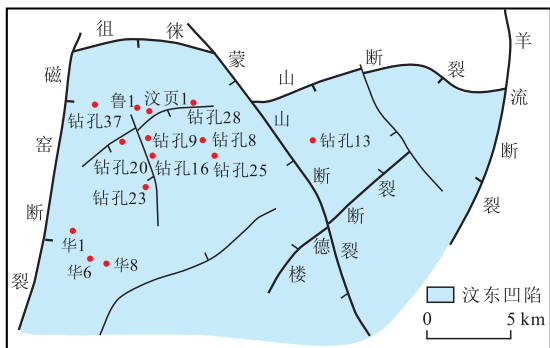


图1 汶东凹陷区域构造位置  
Fig.1 Structural location of Wendong sag

其中汶页1井钻遇近400 m;大汶口组中段沉积厚度为550 m,上段沉积厚度为570 m;且根据沉积环境的较大差异,可以埋深为820 m为界将大汶口组中段划分为上亚段和下亚段。研究区汶页1井的岩心、录井、解吸气测试和含油率测定结果显示,其油气显示活跃,烃类主要以页岩油为主,且纵向上页岩油分布广泛,含油率普遍较高,发育埋深分别为440~560和700~820 m的2个页岩油富集层段。

### 2 页岩油发育特征

为确定汶东凹陷大汶口组的主要含油气类型,首先对埋深为398~905 m的主要油气显示层段进行解吸气测试。结果表明,其总含气量(损失气量校正后)为0.06~0.99 m<sup>3</sup>/t,平均为0.36 m<sup>3</sup>/t,且具有随埋深增大而增大的特征。但主要油气显示层段的总含气量均低于DZ/T 0252—2014页岩气资源/储量计算与评价技术规范<sup>[11]</sup>中厚度大于50 m时总含气量为1 m<sup>3</sup>/t的页岩气藏含气量下限值,因此研究区不属于页岩气藏。岩心观察结果表明,研究区页岩油显示活跃,对汶页1井埋深为460和902 m的油样进行馏分检测发现,温度低于400℃蒸馏出的馏分仅为20%,说明在油组分中以重质成分为主,为低熟重质页岩油。

#### 2.1 纵向分布特征

汶东凹陷汶页1井纵向上含油层的厚度较大,且具有层数多、分布不均匀和含油率高的特点。岩心观察发现,其页岩油主要分布于大汶口组中、上段,埋深为397~1 028 m,且整段均具有原油刺激性气味。汶页1井含油层统计结果(表1)表明,具有明显油迹显示的含油层共有88层,其中最大单层厚度为13.6 m,累积厚度为202.8 m,主要分布于2个页岩油富集层段,具有单层厚度大且连续性较好的特征。

#### 2.2 含油性特征

通过含油率的测定,可以定量分析汶东凹陷页

表1 汶东凹陷汶页1井含油层统计结果

Table1 Statistical table showing thickness of each oil-bearing interval of the Dawenkou Formation in Well Wenye No.1, Wendong sag

地 层	含 油 层		发育层理和裂隙含油层		仅发育裂隙含油层		仅发育层理含油层		未发育层理和裂隙含油层	
	层数/层	厚度/m	层数/层	厚度/m	层数/层	厚度/m	层数/层	厚度/m	层数/层	厚度/m
大汶口组上段	31	101.5	15	81.1	11	13.2	5	7.2		
大汶口组中段上亚段	30	83.4	15	58.2	9	5.2	5	18.6	1	1.4
大汶口组中段下亚段	27	17.9	2	1.8	2	1.8	10	6.2	13	8.1
总计	88	202.8	32	141.1	22	20.2	20	32.0	14	9.5

岩油的含油性。在含油率测试之前,为防止油气挥发,在岩心被取回地面后,稍作清洗即用蜡封存并包裹锡纸,送至实验室进行含油率测定。目前,对于页岩油的评价尚未形成一套规范的标准,现有的测定方法主要是以氯仿沥青A含量或热解得到的残留烃来表示含油率的高低<sup>[12-14]</sup>。对汶东凹陷页岩油含油率的测定采用甲苯溶剂萃取方式,其原理与氯仿沥青A含量测定相同,甲苯和氯仿溶剂均能萃取原油中的非极性物质,但甲苯对比氯仿溶剂的优点在于甲苯作为芳香烃,可以更好地溶解原油中带苯环的烃类,且采用甲苯萃取时的温度高于氯仿,原油各组分溶解更彻底。基于以上原因,利用Dean-Stark抽提装置,采用甲苯溶剂在110.6℃沸点下对研究区大汶口组页岩油中的游离烃进行抽提,进而测定其含油率。

针对汶东凹陷汶页1井109块样品进行含油率测定,结果表明(图2),大部分样品的含油率为

1%~4%,平均含油率为3.7%;其中,大汶口组上段的平均含油率为4.12%,中段上亚段的平均含油率为3.95%,中段下亚段的平均含油率为2.73%。研究区大汶口组上段和中段上亚段的含油层分布密集,单层厚度大且岩性变化相对较小;其中,大汶口组上段埋深为440~560 m和 中段上亚段埋深为700~820 m这2个页岩油富集层段的平均含油率分别为4.1%和4.3%;中段下亚段虽然部分含油层的含油率大于1.5%,但其纵向发育较为稀疏,且单层厚度较小,因此含油性整体较差。

### 3 页岩油富集控制因素

汶东凹陷大汶口组页岩油富集规律主要受沉积环境、有机质丰度和裂隙(层理)发育程度共3个因素控制。沉积环境的变化是控制研究区大汶口组含油率变化的基本因素,还原沉积环境有效地保存了岩层中较高的有机质,而有机质丰度则决定研究区大汶口组烃源岩生成油气的能力。由于大汶口组碳酸盐岩的岩性致密,为低孔、低渗透储层,因此裂隙和层理的发育程度控制其页岩油的富集程度,且为含油性指标的主要控制因素。

#### 3.1 沉积环境

研究区大汶口组沉积于古近系陆相湖盆,受控于湖盆、水深、气候等环境条件演变的影响,其下、中、上段具有不同的沉积环境,导致有机质保存条件亦存在差异。

汶页1井岩心观察结果表明,大汶口组下段沉积一套厚度近400 m的灰绿色、红棕色泥岩与硬石膏岩互层,反映出在大汶口组下段沉积时期湖盆水位较浅、氧气充足,发育灰绿色、红棕色泥岩沉积;而干旱条件下湖水进一步减少,形成以石膏为代表的蒸发岩,二者的频繁互层反映出沉积时水位较浅且深浅周期性变化的特点。由于沉积时水体中氧气充足,导致下段有机质不易保存,平均总有机碳含量仅为0.33%。

在大汶口组中段沉积时期,研究区为深湖一半深湖沉积过渡时期,含油率呈上升趋势。其中,中段下亚段的沉积特征与下段类似,但部分层段云质泥岩的层理发育,与硬石膏或含膏泥岩互层;较厚硬石膏层的出现反映出水体较浅,有机质不易保存,其总有机碳含量仅为0.84%。自中段上亚段沉积时期开始,纯净的石膏层和云质泥、页岩逐渐减少,说明沉积时的湖盆水体逐渐加深,向还原环境

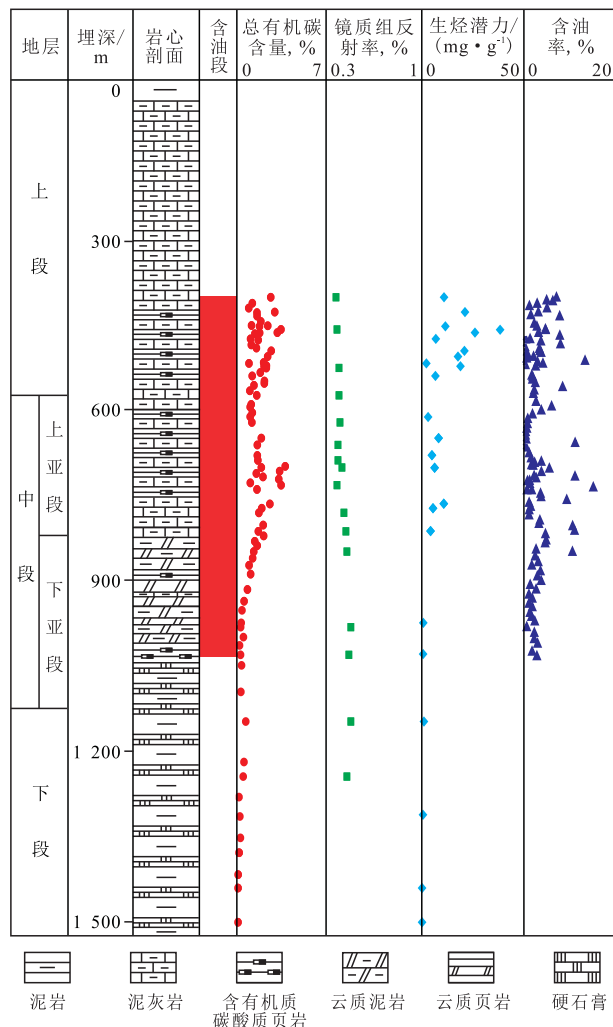


图2 汶东凹陷汶页1井大汶口组岩性和地化特征综合剖面  
Fig.2 Vertical profile of core description and geochemical characteristics in Dawenkou Formation of Well Wenyue No.1 in Wendong sag

过渡,该时期有机质保存条件变好,同时石膏薄层起到盖层的保护作用<sup>[15]</sup>;总有机碳含量开始增高,含油层厚度增大、层数增多,研究区第2个页岩油富集层段即形成于该沉积时期。

在大汶口组上段沉积时期,湖盆范围进一步扩大,水体加深<sup>[7]</sup>,有机质保存条件最为有利。上段的岩性以含有机质碳酸质页岩、成层状的含硬石膏碳酸质泥岩、泥灰岩为主,其中碳酸质页岩为富有机质层与贫有机质层(碳酸盐层)的互层,其纹层较薄,泥质薄层的厚度均为1~2 mm,中间夹碳酸质薄层。由于水体加深,有机质得以有效保存,总有机

碳含量平均为2.25%,为上段的高含油率提供了烃源基础。

### 3.2 有机质丰度

研究结果表明,虽然研究区大汶口组中段和上段的有机质类型、成熟度和生烃潜力等烃源岩特征也存在差异,但其含油性主要受有机质丰度的控制。汶东凹陷大汶口组总有机碳含量主要分布于0~4%(图3a)。其中,上段、中段和下段的平均总有机碳含量分别约为2.25%,1.69%和0.33%。中段上亚段和上段总计厚度为500 m的烃源岩均达到好烃源岩标准,且含油率与总有机碳含量呈较好的正相

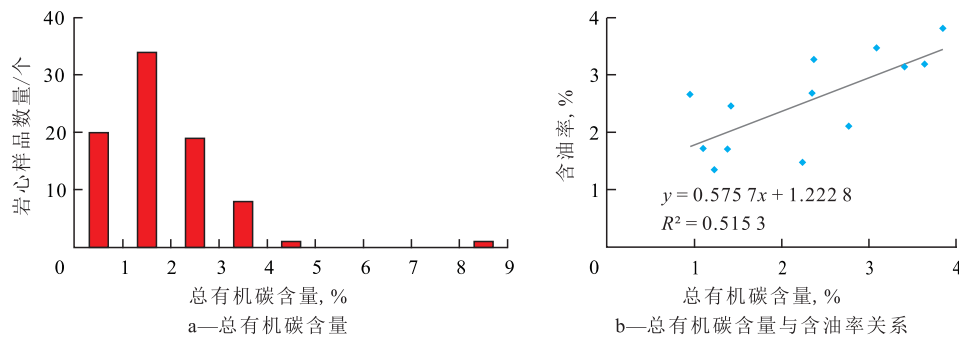


图3 汶东凹陷大汶口组总有机碳含量及其与含油率的关系

Fig.3 Histogram of TOC and cross plot of TOC and oil content of the Dawenkou Formation in Wendong sag

关系(图3b)。

研究区大汶口组烃源岩镜质组反射率主要为0.4%~0.55%,范围跨度较小,表明大汶口组烃源岩刚刚进入生油窗。在大汶口组中、上段不仅见到多套自然硫层,并且发现硫化充填物,可能会促进干酪根的裂解成油。王铁冠曾提出低熟油成因机制中富硫大分子早期降解生烃机理,在富硫的地层中,干酪根易形成更易断裂的S—S键和C—S键,二者在低成熟度时更易断裂生油,可从一定程度上解释研究区大汶口组低熟油产生的原因<sup>[16]</sup>。

显微组分鉴定结果表明,研究区大汶口组干酪根类型以I型为主,其中大汶口组上段主要为I型干酪根,中段以II型干酪根为主,均有利于油气的生成。生烃潜能与含油率对比结果表明,研究区大汶口组干酪根类型与含油率的相关性较小。以2个页岩油富集层段为例,埋深为440~560 m页岩油富集层段的总有机碳含量平均为2.4%,埋深为700~820 m页岩油富集层段的平均总有机碳含量为2.5%,二者较为接近,其镜质组反射率均为0.4%~0.5%,但由于干酪根类型的差异,其生烃潜力存在较大差别。热解分析数据显示,埋深为440~560 m页岩油富集层段的生烃潜能为2.4~40 mg/g,平均为17.6 mg/g,远大于6 mg/g的好烃源岩标准,而埋深

为700~820 m页岩油富集层段的生烃潜量平均仅为7.2 mg/g。虽然二者生烃潜力相差较大,但含油率均约为4%,说明母质类型不是决定含油率大小的主要因素。

综上所述,汶东凹陷大汶口组中、上段整体母质类型较好,除部分层段含有III型干酪根,整体有利于油气的生成。镜质组反射率分析结果表明,研究区大汶口组中、上段镜质组反射率分布范围较小,整体处于生油早期阶段,有机质成熟度变化对含油率的影响较小;但含油率与总有机碳含量呈正相关关系,表明烃源岩的有机质丰度是决定含油率的重要因素。

### 3.3 裂隙(层理)发育程度

除沉积环境和有机质丰度之外,裂隙(层理)发育程度是研究区大汶口组含油性的直接影响因素;对于不同的岩性,裂隙(层理)发育程度对含油性具有不同的控制作用。

岩心薄片鉴定结果表明,研究区大汶口组以碳酸盐岩为主要岩性,上段以碳酸质页岩和泥灰岩为主,中段云质泥、页岩和泥灰岩较为发育。X射线全岩衍射分析结果证实,大汶口组上段和中段上亚段的矿物成份较为接近,主要以碳酸盐矿物为主,粘土质矿物和碎屑矿物含量低(图4),中段下亚段以

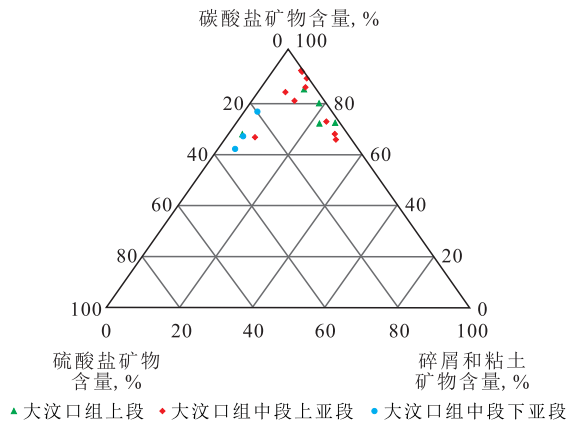


图4 汶东凹陷大汶口组中、上段矿物组成

Fig.4 Mineral composition of the middle-to-upper member of the Dawenkou Formation in Wendong sag

石膏为代表的硫酸盐矿物增多。

汶东凹陷大汶口组不同岩性的含油率差别较大。碳酸质页岩的平均含油率为4.05%，且分布范围较小；泥灰岩的平均含油率为3.23%，但分布差异极大，为0.4%~11%；中段中下部开始增多的云质泥、页岩的平均含油率为2.73%，分布于1.1%~10.6%。因此，碳酸质页岩的整体含油性相对较好。

分析研究区大汶口组含油情况，发现裂隙和层理发育的层段具有良好的油气显示(表1)。在层数为88层、厚度总计为202.8 m的含油层中，发育裂隙、层理或二者共同发育的含油层达到74层共计193.3 m，约占含油层总厚度的95%，且裂隙与层理多为共生关系。通过对仅发育裂隙的泥灰岩岩心样品的含油率进行统计，发现其含油率为5.22%(图5)，高于其他岩性(包括发育页理的碳酸质页岩)。由于含油页岩的页理发育，无法进行准确的孔隙度测量，因此从埋深为700~800 m层段选取泥灰岩岩心样品进行孔隙度和渗透率测试，结果显示发育裂隙的泥灰岩岩心样品的平均孔隙度为9.9%，渗透

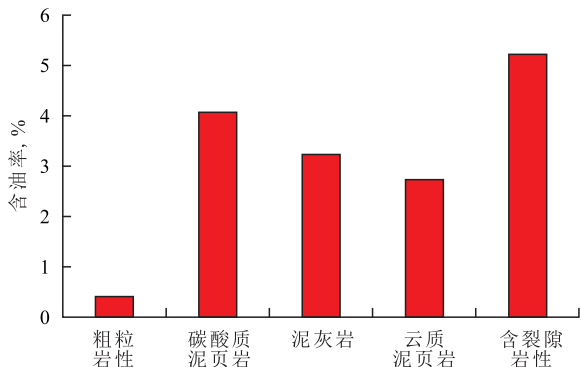


图5 汶东凹陷汶页1井大汶口组不同岩性含油率对比

Fig.5 Histogram of oil content for different lithologies of the Dawenkou Formation in Well Wenye No.1 in Wendong sag

率为 $6.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，含油率为2.58%；未发育裂隙岩心样品的平均孔隙度为9.4%，渗透率仅为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，含油率为1.24%。因此，裂隙和层理的发育改善了地层的渗透性，且由于裂隙中胶结物质较少，更有利于烃类聚集于裂隙(层理)中，形成页岩油的富集成藏。碳酸质页岩由于层理和裂隙非常发育，通常具有良好的含油性；而泥灰岩和云质泥、页岩由于层理发育程度差于碳酸质页岩，因此裂隙发育区则成为主要的含油区域，也导致其含油率差异较大。由此可见，层理和裂隙的发育程度控制储层的储集条件，进而控制页岩油富集程度。

## 4 结论

汶东凹陷大汶口组烃类主要以低熟重质页岩油形式富集，具有累积厚度大、层数多、埋藏浅、含油率普遍较高、分布差异较大的特点；其作为非常规能源，具有较大的勘探开发潜力。研究区大汶口组页岩油的富集规律主要受控于沉积环境、有机质丰度和裂隙(层理)发育程度3个因素，其中裂隙(层理)发育程度直接控制油气的聚集成藏。研究区下步勘探目标为大汶口组上段和中段上亚段，可以结合适用于研究区岩性特征的多波多分量地震技术，利用纵、横波地震属性对储层中发育的裂隙进行精细预测，进一步落实裂隙发育区，为研究区参数井部署及压裂改造的可能性研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 宋莫南. 山东中生代盆地基本特征及演化过程[J]. 山东地质, 2001, 17(5): 5-10.  
Song Diannan. Basic characteristics and evolution history of Mesozoic basins in Shandong province [J]. Geology of Shandong, 2001, 17(5): 5-10.
- [2] 李守军, 郑德顺, 蔡进功, 等. 鲁北和鲁西南地区古近纪盆地沉积特征与控制因素探讨[J]. 地质论评, 2003, 49(3): 225-232.  
Li Shoujun, Zheng Deshun, Cai Jingong, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of basins in the North Shandong and Southwest Shandong in Palaeogene [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 225-232.
- [3] 李理, 钟大赉, 时秀朋. 鲁西隆起和济阳拗陷新生代隆拗耦合关系[J]. 地质学报, 2007, 81(9): 1 215-1 228.  
Li Li, Zhong Dalai, Shi Xiupeng. Cenozoic uplifting/subsidence coupling between the West Shandong Rise and the Jiyang Depression, Northern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(9): 1 215-1 228.
- [4] 盛湘, 陈祥, 章新文, 等. 中国陆相页岩油开发前景与挑战[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 267-271.

- Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 267-271.
- [5] 孙志鹏. 能源安全与中国外交转型[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(5): 58-63.
- Sun Zhipeng. Energy security and China's foreign policy transition [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(5): 58-63.
- [6] 徐祖新, 姜文亚, 刘海涛. 常规与非常规油气关系研究现状与发展趋势[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(3): 14-19.
- Xu Zuxin, Jiang Wenya, Liu Haitao. Research status and development tendency of the relationship between conventional and unconventional oil and gas [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(3): 14-19.
- [7] 张多文. 汶东凹陷古近纪地层特征及沉积环境分析[J]. *山东国土资源*, 2004, 20(2): 29-33.
- Zhang Duowen. Analysis on strata characteristics and sedimentary environment of Paleogene system in Wendong depression [J]. *Shandong Land and Resources*, 2004, 20(2): 29-33.
- [8] 朱德燕, 王勇, 银燕, 等. 断陷湖盆咸化环境沉积与页岩油气关系——以东营凹陷、渤南地区为例[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(6): 7-13.
- Zhu Deyan, Wang Yong, Yin Yan, et al. Study on the relationship between saline environmental deposition and shale oil-gas in faulted basin: A case study of areas of Dongying sag and Bonan subsag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6): 7-13.
- [9] 袁吉鲁. 鲁西隆起汶东凹陷大汶口组储层特征研究[J]. *胜利油田职工大学学报*, 2004, 18(1): 34-36, 45.
- Yuan Jilu. Reservoir characteristics research of Dawenkou group of Wendong sag in Luxi uplift [J]. *Journal of Shengli Oilfield Staff University*, 2004, 18(1): 34-36, 45.
- [10] 胡秋媛, 李理. 鲁西地区晚中生代—古近纪伸展构造的应力场数值模拟[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(2): 259-266.
- Hu Qiuyuan, Li Li. Numerical simulations of tectonic stress fields for Late Mesozoic—Paleogene extensional tectonics in western Shandong [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(2): 259-266.
- [11] 陈永武, 王少波, 韩征, 等. DZ/T 0254—2014 页岩气资源/储量计算与评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-15.
- Chen Yongwu, Wang Shaobo, Han Zheng, et al. DZ/T 0254—2014 Regulation of shale gas resources/reserves estimation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014: 1-15.
- [12] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 249-256.
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249-256.
- [13] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳坳陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 463-471.
- Song Guoqi, Xu Xingyou, Li Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 463-471.
- [14] 王文广, 郑民, 王民, 等. 页岩油可动资源量评价方法探讨及在东濮凹陷北部古近系沙河街组应用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(4): 771-781.
- Wang Wenguang, Zheng Min, Wang Min, et al. The discussion of the evaluation method of shale oil movable resources amount and Palaeogene Shahejie Formation application effect in the northern of Dongpu Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(4): 771-781.
- [15] 孙利, 余光华, 李建革, 等. 东濮凹陷膏盐岩沉积控制因素及其对油气成藏的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 27-31.
- Sun Li, Yu Guanghua, Li Jiange, et al. Controlling factors of gypsum-lith sedimentary and its impact on hydrocarbon reservoirs in Dongpu sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 27-31.
- [16] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 中国低熟油的几种成因机制[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 75-83.
- Wang Tieguan, Zhong Ningning, Huo Dujie, et al. Several genetic mechanisms of immature crude oils in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 75-83.

编辑 邹澍滢