

陆相页岩层系非泥页岩夹层发育程度定量表征

王保华, 李浩, 陆建林, 吕剑虹, 王苗, 赵琳洁

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要: 勘探实践表明, 富有机质页岩层段中的砂岩夹层或碳酸盐岩夹层的发育程度是页岩油富集高产的关键因素之一。目前尚无针对上述夹层发育程度的定量评价模型和方法, 建立页岩相对高渗夹层定量评价模型, 完善该地质因素定量评价流程和方法具有重要意义。利用夹层在地层中发育、分布的位置及分散程度, 建立表征夹层发育程度的数学模型。以地层岩性属性的地震反演数据体、三维构造建模数据体、钻井数据为基础, 以虚拟/实际钻井岩性数据为计算单元, 应用夹层厚度比临界值为约束, 通过建立数学模型, 对钻井开展夹层发育强度(*DS*)、分布位置(*DP*)及分散系数(*DC*)计算。再通过归一化处理综合计算夹层发育指数(*STI*), 结合沉积相研究结果确定的主要物源方向, 采用克里金插值计算目的层 *STI* 的平面分布。应用上述方法, 对渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段 *STI* 进行计算, 通过与现有钻井试油成果对比, 高产井 *STI* 主要在 0.4~0.8 之间, 显示 *STI* 分布范围对页岩油勘探井的部署具有参考意义。

关键词: 页岩; 夹层; 分散系数; 夹层发育指数(*STI*); 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Quantitative characterization of development of permeable interlayers in continental shale strata

WANG Baohua, LI Hao, LU Jianlin, LÜ Jianhong, WANG Miao, ZHAO Linjie

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Exploration practice shows that the development of sandstone interlayers or carbonate interlayers in organic-rich shale intervals is one of the key factors for shale oil enrichment and high yield. At present, there is no quantitative evaluation model or method for the development degree of these interlayers. The quantitative evaluation model of relative hypertonic interlayers in shale is established. It is of great significance to improve the quantitative evaluation process. A mathematical model for characterizing the development of the interlayers is established by using the position and dispersion of interlayers in a formation. Based on seismic inversion data, three-dimensional structural modeling and drilling data of the lithology properties of the formation, the virtual/actual drilling lithology data is used as the calculation unit, and the sandstone thin interlayer index (*STI*) is used as the constraint value. The developmental strength (*DS*), distribution position (*DP*) and dispersion coefficient (*DC*) of the well were calculated. Then, the *STI* is calculated by normalization, and the main source direction is determined by the results of sedimentary facies research. The *STI* plane distribution of the target layer is calculated by Kriging interpolation. Using the above method, the *STI* of the upper part of the Shahejie Formation in the Dongying Sag was calculated. Compared with the existing drilling test results, the *STI* of the high-yield well is mainly between 0.4 and 0.8, indicating that the *STI* distribution range has a guiding significance for shale oil exploration.

Key words: shale; interlayer; dispersion coefficient; *STI* index; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

随着非常规油气,特别是页岩油气的成功勘探开发,泥页岩作为油气储层引起了研究者的广泛关注^[1-9]。统计表明,国内外成功获得页岩油气突破地区的泥页岩段均发育一定比例的非泥页岩夹层^[10-16],如灰岩、白云岩、细砂岩等相对高渗透性

夹层^[17],且页岩油气产量与泥页岩段中的夹层岩性、数量、厚度、物性及分布规模有很大的关系。例如,济阳坳陷 35 口出油流井中,24 口为夹层型,占 68.6%;仅 11 口为无夹层的纯页岩,占 31.4%^[18]。夹层在页岩油成藏过程中起着“仓储层”和“输导层”

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2019-07-25。

作者简介: 王保华(1982—),男,高级工程师,从事油气评价研究。E-mail: wangbh.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家油气重大专项“陆相页岩油资源潜力评价与分布规律”(2017ZX05049001-006)和“海相碳酸盐岩层系油气资源潜力评价与战略选区”(2017ZX05005001-004)联合资助。

的作用,因此泥页岩中发育夹层是页岩油稳产、高产的关键所在。

我国东部新生代湖泊受气候和构造影响较大,在水体高频振荡、重力流以及古盐度变化作用下,深湖古近系泥页岩层系中发育众多夹层。东部不同地区夹层岩性纵向构成也表现出一定的差异,总体而言包括砂岩、碳酸盐岩和盐间型夹层 3 种。砂岩夹层一般发育于深水浊积岩体系或三角洲前缘,以泌阳凹陷核三段 2~6 号层和济阳拗陷沙三段下亚段为代表;碳酸盐岩夹层一般发育于咸湖中,以东濮凹陷沙三段和济阳拗陷沙四段上亚段为代表;盐间型夹层主要发育于盐湖,以潜江凹陷潜三段为代表。因此,无论从夹层在页岩油富集高产中的重要性,还是从我国古近系陆相页岩夹层发育的广泛性来讲,都有必要开展页岩夹层定量评价研究。

关于泥页岩层系中夹层的岩性及厚度标准,前人开展过相关研究工作,并制定了相关的国家/企业标准。如《页岩气资源—储量计算与评价技术规范:GB/T 0254—2014》^[19]规定,当累计夹层厚度小于层组总厚度的 20% 时,夹层中产出的页岩气称为夹层型页岩气。《页岩气地质评价方法:GB/T 31483—2015》^[20]进一步规定,富有机质页岩层段是指富有机质页岩及富有机质页岩与粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩等夹层的地质单元,规定夹层单层厚度不大于 1 m,累计夹层厚度占该页岩层段总厚度比例小于 20%。中国石化则在累计夹层厚度小于层组厚度 20% 的基础上,将大段泥页岩中厚度小于 2 m 且产出原油的夹层定义为页岩油夹层,并制定了相关企业标准^[21]。胜利油田也将上述标准作为判断渤南凹陷夹层型页岩油^[22]的依据,而济阳拗陷的夹层型页岩油则规定为夹层单层厚度小于 2.5 m。

人们已普遍认识到泥页岩夹层对页岩油气富集及产出的重要性,并制定了相关的标准以规定单层夹层厚度和累计夹层厚度所占比例,但对夹层在泥页岩段中的分布情况(单位厚度地层中夹层数量、分布位置、分散程度等)缺乏一个定量的判别指标,而确定富有机质泥页岩段中的夹层分布特征,对泥页岩储层评价和页岩油气资源量估算具有重要意义。

1 定量评价方法建立

1.1 评价原理

依据常规油气探明储量单层有效厚度、获页岩油井夹层厚度及夹层在地层中总厚度,将单层夹层

厚度定为 2.5 m,夹层占地层比例上限定为 40% (页岩气的国家标准是 20%)。一般而言,排烃效率与岩性组合特征关系密切,砂泥互层型最有利于排烃,评价非泥页岩夹层发育程度还要考虑非泥页岩夹层纵向上在泥页岩层系中的分布及在地层中的整体位置(图 1)。因此,夹层指数(*STI*)定义为:在夹层总厚度占地层比例小于上限条件下,考虑单位厚度地层夹条数(频率)、夹层纵向分布特征(离散度)及夹层在地层中所处平均位置,将这 3 个因素通过夹层发育强度(*DS*)、分布位置(*DP*)及分散系数(*DC*)这 3 个定量参数及相应数学模型表示,再通过这 3 个参数建立反映夹层发育程度的综合指数 *STI* 模型,它可以定量反映夹层的发育程度。

1.2 表征方法总流程

以地层岩性属性的地震反演数据体、三维构造建模数据体、钻井数据为基础,首先根据研究需要抽取若干虚拟/实际钻井岩性数据,统计目的层渗透性夹层累计厚度及层数,若夹层厚度占地层比例不超过上限值,则计算夹层发育强度、分布位置及分散系数;再通过表征夹层发育程度的数学模型计算夹层发育指数(*STI*),否则 *STI* 为无效值;最终应用前述计算的多口虚拟/实测钻井的 *STI*,结合沉积相研究结果确定的主要物源方向,采用克里金插值计算目的层 *STI* 的平面分布,为科学定量评价泥页岩中渗透性夹层发育程度提供科学依据。

1.3 技术方法建立

1.3.1 参数说明

为了便于更加清晰地阐述数学模型,现对本方法所需的输入数据及参数做以下说明及假设。

(1)输入数据说明:①地震反演体:通过地震岩性反演获得的反映地层岩性的地震数据体,一般为时间域数据体,通过时深转换可将数据转换为深度域,数据体格式为 SGY 格式,数据体节点值代表对应空间节点处预测的岩性。②三维构造建模:通过构造建模软件获得的地层三维岩性数据体,数据

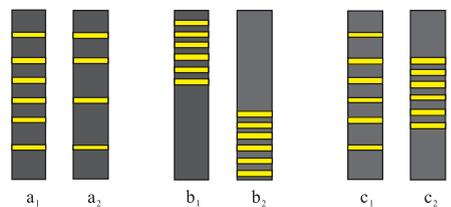


图 1 夹层发育程度评价因素

a_1 . 夹层频率相对较高; a_2 . 夹层频率相对较低; b_1 . 夹层位于地层中上部; b_2 . 夹层位于地层中下部; c_1 . 夹层较分散; c_2 . 夹层较集中

Fig.1 Evaluation factors of interlayer development degree

地点在纵向上排列一致,数据节点值代表对应空间节点处预测的岩性。③钻井数据:通过录井或测井预测获得的目的地层岩性数据。

(2)参数定义:①夹层临界值:指在泥页岩中发育的渗透性相对较好的非泥质夹层,如碳酸盐岩、白云岩和细砂岩等,根据国标或企标规定,在页岩油气评价中渗透性夹层累计厚度占地层比例(厚度占比)不超过指定值,单层厚度不超过指定值,设厚度占比临界值(上限)为 S_0 ,单层厚度临界值(上限)为 E 。②夹层发育强度(DS):指一套泥页岩段地层中渗透性夹层个数占泥页岩段地层厚度的比例,是反映指定厚度的泥页岩地层发育渗透性夹层个数多少的参数。③夹层分布位置(DP):指一套泥页岩段地层中渗透性夹层在泥页岩段地层中整体分布位置,夹层整体越靠近地层上部取值越大,是反映夹层在泥岩段中整体靠近上部或下部的一个定量参数。④夹层分散系数(DC):指一套泥页岩段地层中渗透性夹层在泥页岩段中均匀(分散)分布程度,夹层分布越均匀取值越大,是反映夹层在泥岩段中均匀(分散)分布程度的定量表征参数。⑤夹层发育指数(STI):指一套泥页岩段地层中渗透性夹层在泥页岩段地层中的发育情况,是综合反映夹层的发育数量、分布位置及分散状况的定量表征参数。⑥烃源岩有限排烃厚度:烃源岩生成油气之后,油气并不是全部排出烃源岩,只有与储层相接触的一定距离内的生油层内的烃类才能排出来,该段距离为有效排烃厚度,假设为 EH ,即当烃源岩厚度小于 EH 时,烃源岩中的油气可以排出。

1.3.2 数学模型建立

泥页岩渗透性夹层定量评价方法及步骤如下:

(1)从已有的地震反演体、三维构造建模数据体或钻井岩性数据中抽取虚拟/实际钻井岩性数据。地震反演体及三维构造建模数据体均为三维空间节点数格式,数据纵向节点对齐,因此可根据研究需要在平面上选取若干网格点处作为虚拟井,抽取网格点处纵向深度及岩性数据。若输入数据为实际钻井岩性数据则直接应用。钻井数据(虚拟井/实际井)至少包括深度(一个岩性的顶深和底深)及对应岩性。虚拟井及实际井选取时最大深度应当超过研究的目的层。

(2)参数假设:设研究目的地层顶、底深度分别为 HT 和 HB ,则目的地层厚度 $L=HB-HT$;统计目的层中渗透性夹层(如灰岩、白云岩、细砂岩等指定岩性,单层厚度不超过临界值 E)层数。设渗

透性夹层层数为 N ,自上而下第 i 层夹层顶、底埋深分别为 HT_i 和 HB_i ,则第 i 层夹层厚度 $L_i=HB_i-HT_i$,渗透性夹层累计厚度(SL)通过公式(1)求取,夹层厚度占比(S)通过公式(2)求取。

$$SL = \sum_{i=0}^N L_i \quad (1)$$

$$S = (SL/L) \times 100\% \quad (2)$$

(3)夹层厚度占比判定:①若地层厚度 $L=0$ 或夹层累计厚度占比 $S>S_0$,则 STI 值无效;②若地层厚度 $L>0$ 且夹层个数 $N=0$,则 $STI=0$;③若地层厚度 $L>0$ 且 $N>0$,则 STI 值计算采用下述(4)~(7)步骤。

(4)夹层发育强度(DS)计算:

$$DS = N/L \quad (3)$$

(5)夹层分布位置(DP)计算:

$$DP = (HB - \sum_{i=1}^N (HB_i + HT_i) / 2N) / (HB - HT) \quad (4)$$

(6)夹层分散系数(DC)计算:

$$DC = \left[\left(HT - \frac{HB_1 + HT_1}{2} \right)^2 + \left(HB - \frac{HB_N + HT_N}{2} \right)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{HB_i + HT_i - HB_{i+1} - HT_{i+1}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} / (n+1) \quad (5)$$

(7)夹层发育指数(STI)计算:针对 DS 、 DP 、 DC 进行归一化处理,采用归一化 DS^* 、 DP^* 、 DC^* 值计算夹层发育指数。

①夹层发育强度归一化:根据前述有效排烃厚度定义,理想状况下当夹层均匀分布且烃源岩厚度不超过有效排烃厚度时,岩性组合配置满足油气排烃要求,因此夹层发育强度应不低于 $1/EH$,夹层发育强度归一化采用下列公式:

$$DS^* = \begin{cases} DS \cdot EH & \left(DS < \frac{1}{EH} \right) \\ 1 & \left(DS \geq \frac{1}{EH} \right) \end{cases} \quad (6)$$

②夹层分布位置归一化:夹层分布系数表征夹层发育的位置对油气排烃、输导的影响,在浮力作用下油气一般更容易进入靠近地层上部的夹层。根据实际地质情况,采用指数模型对夹层分布系数进行归一化:

$$DP^* = DP^n \quad (7)$$

式中: n 取 $(0,1)$ 之间, n 值越大,表示夹层分布位置对油气排烃及输导影响越大。

③夹层分散系数归一化:一般地,夹层在一套地层中的均匀分布程度是相对同样数量的夹层平均分布在一套地层中的夹层分散系数而言的,且大多数情况下夹层分布难以达到均匀分布程度。采用指数模型进一步优化夹层分散系数对夹层发育指数的影响:

$$DC^* = \{ [L - DC(N+1)] / (L - L/\sqrt{N+1}) \}^m \quad (8)$$

式中: L 为地层厚度; N 为地层中夹层数; m 取(0, 1)之间, m 值越大,表示夹层分散均匀分布程度对油气排烃及输导影响越大,一般取 $m+n=1$, n 为公式(7)中定义参数。

综合上述归一化参数,求取夹层发育指数:

$$STI = \sqrt[3]{DS^* \cdot DP^* \cdot DC^*} \quad (9)$$

(8)应用上述步骤(2)~(7)计算选取的虚拟/实际钻井目的层的 STI 、 DS 、 DP 和 DC 数值,结合钻井对应的地理坐标(x, y),形成数据列表。

(9)以步骤(8)形成的数据列表为基础,结合沉积相研究成果,确定沉积物源主方向。采用克里金插值算法,勾绘泥页岩地层中渗透性夹层发育指数(STI)平面分布。插值时通过泥页岩厚度控制数据边界,一般选取泥页岩地层厚度小于 10 m 则不计算(具体根据研究需要可适当调整)。

2 应用

通过对页岩层段夹层厚度、数量及空间分布等因素的研究,建立页岩高渗夹层定量评价模型—— STI 指数模型,并应用实际钻井产能数据校验评价

模型,进一步确定评价模型关键参数取值。采用上述方法,针对渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段非泥页岩夹层评价开展了初步应用。选取 98 口钻井为基础(包括 23 口工业油流井),应用地层岩性自动统计软件及 Eops 软件 Geolog 模块对钻井岩性进行识别及分类,结合录井岩性数据,将钻井岩性数据量化。采用 SKAU 建模模块,刻画沙四上亚段页岩层系单井岩性剖面,同时预测了该层段的非泥页岩夹层空间分布。在此基础上,结合 STI 模型,开展沙四上亚段非泥页岩发育程度定量评价。对东营凹陷钻井及构造层位资料系统分析表明,东营地区富有机质页岩层内夹层岩性主要为砂岩、灰岩及白云岩,泥页岩厚度约占总地层厚度的 80%,夹层厚度约占 15%,超过 3 m 的夹层约占 5%;夹层中 43%为砂岩夹层,35%为灰质夹层,22%为白云岩夹层。通过对钻井录井岩性数据数字化,结合测井岩性预测标定,将岩性曲线转换为离散数值,采用序贯高斯算法,预测东营凹陷沙四上亚段夹层空间分布特征。依据上述夹层分布空间模型,结合钻井夹层发育指数,计算编制东营凹陷沙四上亚段夹层指数(STI)平面分布图(图 2)。从图 2 中可知,东营凹陷沙四段上亚段 STI 值总体在 0.4~0.9 之间,夹层较发育地区主要分布在凹陷南部地区,包括牛庄洼陷南斜坡、利津洼陷南斜坡以及博兴洼陷;洼陷带内部 STI 值一般较低,主要分布在 0.1~0.4 之间,整体上洼陷带内部夹层欠发育。洼陷带内部局部地区,如史 13 井区、樊 120—樊 137 井区, STI 值较高,为 0.4~0.8,可能与重力流有关。

从东营凹陷工业性页岩油流段夹层指数与产

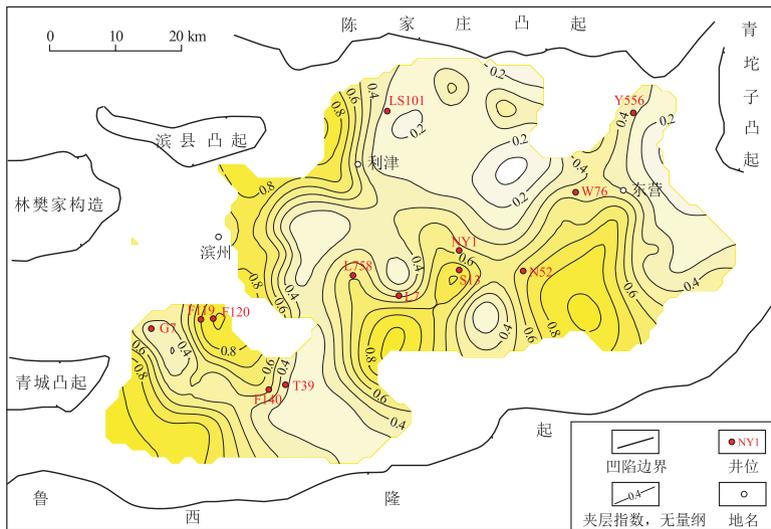


图 2 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段高渗夹层指数平面分布

Fig.2 Plane distribution of high permeability interlayer index in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

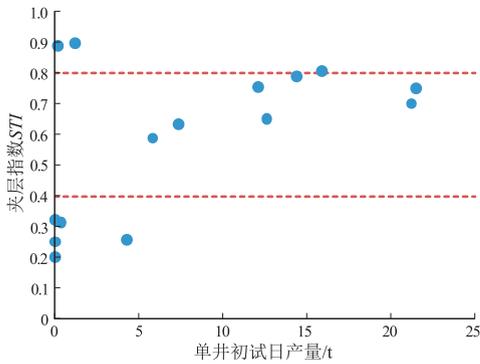


图3 渤海湾盆地东营凹陷工业性夹层指数与页岩油日产量关系

Fig.3 Relationship between industrial interlayer index and daily production of shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

能关系图(图3)可知,工业油流段的夹层指数 STI 值一般在 0.2~0.9 之间,其中高产井主要在 0.4~0.8 之间。此外,夹层型是重要的页岩油富集类型, STI 指数 0.4~0.8 的区域一般分布在内斜坡或者是靠近内斜坡的洼陷带,该区域是夹层型页岩油的勘探有利区。

3 结论

(1) 针对泥页岩层系(泥地比大于规定值)中相对高渗薄夹层出现的频率、在地层中分布的整体位置及夹层在地层中分布的均匀程度,建立了夹层定量表征模型,可有效评价泥页岩层系薄夹层发育程度。

(2) 应用本方法对东营凹陷沙四上亚段页岩中相对高渗夹层发育程度开展评价,沙四段上亚段 STI 值总体在 0.4~0.9 之间,夹层较发育地区主要分布在斜坡带一侧,洼陷带内部 STI 值整体较低。通过与现有钻井试油成果对比,高产井 STI 主要分布在 0.4~0.8 之间,显示 STI 分布范围对页岩油勘探井的部署具有参考价值。

(3) 本方法为夹层型页岩油勘探选区提供了定量参考, STI 指数在 0.4~0.8 的区域是该类型页岩油富集的有利区。

参考文献:

[1] 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等.陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J].石油勘探与开发,2018,45(3):361-372.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: a case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361-372.

[2] 杨智,侯连华,林森虎,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J].中国石油勘探,2018,23(4):76-85.
YANG Zhi, HOU Lianhua, LIN Senhu, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 76-85.

[3] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[M]. Washington DC: ARI, 2013.

[4] U.S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2017[R]. Washington DC: U.S. Energy Information Administration, 2017.

[5] EGENHOFF S O, FISHMAN N S. Traces in the dark: sedimentary processes and facies gradients in the upper shale member of the Upper Devonian - Lower Mississippian Bakken Formation, Williston Basin, North Dakota, U.S.A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 83(9): 803-824.

[6] 姜生玲,张金川,李博,等.中国现阶段页岩气资源评价方法分析[J].断块油气田,2017,24(5):642-646.
JIANG Shengling, ZHANG Jinchuan, LI Bo, et al. Analysis of shale gas resources assessment method in China[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(5): 642-646.

[7] 余涛,卢双舫,李俊乾,等.东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J].断块油气田,2018,25(1):16-21.
YU Tao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 16-21.

[8] 周立宏,于超,滑双君,等.沧东凹陷孔二段页岩油资源评价方法与应用[J].特种油气藏,2017,24(6):1-6.
ZHOU Lihong, YU Chao, HUA Shuangjun, et al. Shale oil resource estimation and application in Kong2 Member of Cangdong Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 1-6.

[9] 谢文泉,刘招君,肖丽佳,等.柴北缘鱼卡地区中侏罗统石门沟组油页岩资源潜力[J].特种油气藏,2018,25(5):78-83.
XIE Wenquan, LIU Zhaojun, XIAO Lijia, et al. Oil shale resource potential of the Middle Jurassic Shimengou Formation in Yuka of the north rim in Qaidam Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 78-83.

[10] 高辉,何梦卿,赵鹏云,等.鄂尔多斯盆地长7页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J].石油实验地质,2018,40(2):133-140.
GAO Hui, HE Mengqing, ZHAO Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics of Chang 7 shale oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133-140.

[11] 包友书.渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油主要赋存空间探索[J].石油实验地质,2018,40(4):479-484.
BAO Youshu. Effective reservoir spaces of Paleogene shale oil in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 479-484.

[12] 包友书.济阳拗陷超压和应力场对页岩油富集的影响[J].断块油气田,2018,25(5):585-588.

BAO Youshu. Influence of overpressure and stress on shale oil enrichment in Jiyang Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(5) : 585-588.

[13] 崔景伟, 朱如凯, 杨智, 等. 国外页岩层系石油勘探开发进展及启示 [J]. *非常规油气*, 2015, 2(4) : 68-82.

CUI Jingwei, ZHU Rukai, YANG Zhi, et al. Progresses and enlightenment of overseas shale oil exploration and development [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(4) : 68-82.

[14] 王保华, 陆建林, 李浩, 等. 基于孔隙成因的泥页岩总孔隙度恢复方法研究: 以渤海湾盆地东营凹陷沙三下亚段为例 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5) : 724-728.

WANG Baohua, LU Jianlin, LI Hao, et al. Recovery method for total porosity of shale based on porosity origin: a case study of the lower part of the third member of Shahejie Formation in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5) : 724-728.

[15] 李红英, 陈善斌, 杨志成, 等. 巨厚油层隔夹层特征及其对剩余油分布的影响: 以渤海湾盆地 L 油田为例 [J]. *断块油气田*, 2018, 25(6) : 709-714.

LI Hongying, CHEN Shanbin, YANG Zhicheng, et al. Characteristics of interbeds in thick oil layer and its effect on remaining oil distribution: a case study of L Oilfield, Bohai Bay Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(6) : 709-714.

[16] 李佳欣. 观音桥段地质特征及其对页岩气产量的影响: 以南川地区为例 [J]. *油气藏评价与开发*, 2018, 8(4) : 68-72.

LI Jiaxin. Geological features of Guanyinqiao member and its influence on the shale gas production: a case study of Nanchuan district [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2018, 8(4) : 68-72.

[17] 刘毅, 陆正元, 戚明辉, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组页岩油微观储集特征 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39(2) : 180-185.

LIU Yi, LU Zhengyuan, QI Minghui, et al. Microscopic characteristics of shale oil reservoirs in Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(2) : 180-185.

[18] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳拗陷页岩油富集主控因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4) : 20-25.

WANG Yong, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4) : 20-25.

[19] 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 calculating and evaluating shale gas resources/reserves: DZ/T 0254-2014 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2014.

[20] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 页岩气地质评价方法: GB/T 31483-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Geological evaluation methods for shale gas: GB/T 31483-2015 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2015.

[21] 刘超英, 徐旭辉, 刘翠荣, 等. 页岩油勘探选区评价方法: Q/SH 0505-2013 [S]. 北京: 中国石化出版社, 2013.

LIU Chaoying, XU Xuhui, LIU Cuirong, et al. Shale oil exploration constituency evaluation method: Q/SH 0505-2013 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2013.

[22] 朱德顺, 王勇, 朱德燕, 等. 渤南洼陷沙一段夹层型页岩油界定标准及富集主控因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(5) : 15-20.

ZHU Deshun, WANG Yong, ZHU Deyan, et al. Analysis on recognition criteria and enrichment factors of interlayer shale oil of Es₁ in Bonan Subsag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(5) : 15-20.

(编辑 韩 彧)



(上接第 878 页)

[28] VENDEVILLE B C, JACKSON M P A. The rise of diapirs during thin-skinned extension [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9(4) : 331-354.

[29] FARZIPOUR-SAEIN A, KOYI H. Effect of lateral thickness variation of an intermediate decollement on the propagation of deformation front in the Lurestan and Izeh zones of the Zagros Fold-Thrust Belt, insights from analogue modeling [J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 65 : 17-32.

[30] 杨少敏, 李杰, 王琪. GPS 研究天山现今变形与断层活动 [J]. *中国科学(D 辑 地球科学)*, 2008, 38(7) : 872-880.

YANG Shaomin, LI Jie, WANG Qi. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan Mountains inferred from GPS observations [J]. *Science in China (Series D Earth Sciences)*, 2008, 51(8) : 1064-1080.

[31] SUPPE J, CONNORS C, ZHANG Yikun. Shear fault-bend folding [M] // MCCLAY K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG memoir 82. Tulsa: AAPG, 2004 : 303-323.

[32] 胡建中, 谭应佳, 张平, 等. 塔里木盆地西南缘山前带逆冲推覆构造特征 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(2) : 222-231.

HU Jianzhong, TAN Yingjia, ZHANG Ping, et al. Structural features of Cenozoic thrust-fault belts in the piedmont of southwestern Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2) : 222-231.

[33] KAUS B J P. Factors that control the angle of shear bands in geodynamic numerical models of brittle deformation [J]. *Tectonophysics*, 2010, 484(1/4) : 36-37.

[34] 黄光明, 王岳军, 赵勇刚, 等. 大巴山前陆冲断带构造样式和演化过程的数值模拟 [J]. *地质学报*, 2016, 90(4) : 653-668.

HUANG Guangming, WANG Yuejun, ZHAO Yonggang, et al. Numerical simulation of structural styles and evolution of the Daba Shan Foreland Thrust Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(4) : 653-668.

(编辑 徐文明)