

沾化凹陷渤南洼陷超压裂缝的测井响应特征与预测

刘 华¹, 蒋有录¹, 叶 涛², 刘雅利³, 张丰荣¹, 卢 浩³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;
3. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257001)

摘要:通过岩心观察、成像测井识别与常规测井资料分析相结合的方法,对渤南洼陷烃源层系内超压裂缝的特征、测井响应标志及预测进行研究。结果表明:渤南洼陷超压源岩层系中裂缝发育,裂缝数量和规模不一,在成像测井上表现为中高角度、倾向杂乱的高导缝;常规测井曲线具有高声波时差、高补偿中子孔隙度、高密度、高地层真电阻率变化率和低自然伽马变化率的“四高一低”的响应特征;超压裂缝大量发育于地层压力系数大于 1.2 且压力梯度变化大的区域,在压力梯度变化较小的高压区域,可识别裂缝的数量较少、规模较低;超压裂缝带具有横向上连续、纵向上分段的特征,与油气的空间分布匹配性较好,是超压体控制下源岩排烃的重要通道。

关键词:裂缝识别;超压源岩;测井响应特征;沾化凹陷

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A

引用格式:刘华,蒋有录,叶涛,等. 沾化凹陷渤南洼陷超压裂缝的测井响应特征与预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):50-56.

LIU Hua, JIANG Youlu, YE tao, et al. Logging response of overpressure fractures and their prediction in Bonan sag, Zhanhua depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 50-56.

Logging response of overpressure fractures and their prediction in Bonan sag, Zhanhua depression

LIU Hua¹, JIANG Youlu¹, YE Tao², LIU Yali³, ZHANG Fengrong¹, LU Hao³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin 300452, China;
3. Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257001, China)

Abstract:Based on core observations and imaging the forming logging and conventional logging, the logging responses of the overpressure fractures and their distribution within the source rocks were analyzed in Bonan sag, Bohai Bay Basin. Many fractures are observed in the Third Member of Shahejie Formation with high overpressure, but their quantity and scales are different. Overpressure fractures show highly conductive feature with middle-high angle and disorder inclination in the imaging logging data, and they always have distinctive features such as high rate of change of AC, CNL, DEN, Rt and low rate of change of GR in conventional logging curves. Fractures produced by overpressure are greatly developed in those areas where pressure coefficients are bigger than 1.2 and pressure gradient changes rapidly, while fractures of smaller scale are also developed in the overpressure areas where the pressure gradient changes slowly. As the main primary migrating pathway, the fracture zones within overpressure source rocks affect the spatial distributions of hydrocarbons. Fracture zones are laterally continuous and are distributed in several segments on the longitudinal direction, which agrees well with the distribution of hydrocarbons in Bonan sag.

Keywords:fracture identification; overpressure source rocks; characteristic of logging response; Zhanhua depression

据统计,世界范围内 90% 的超压盆地与油气分布具有成因联系^[1-3]。超压作为油气初次运移的动力,当其大于地层破裂压力时会形成裂缝(即超压裂缝),是油气初次运移的重要通道。人们普遍认为超压裂缝的形成机制与压力密切相关^[4-6],但在开启次数和分布空间的认识上存在着较大的争议^[2,7-10]。超压裂缝由于形成机制的特殊性,往往具有缝面粗糙,产状不规则,方向性较差的特点^[11],可通过岩心观察、薄片观察等^[11-12]进行识别,但是受限于岩心资料的丰富程度。各种常规测井对裂缝发育段具有不同程度的响应特征,但在超压裂缝识别上难度较高,其中成像测井(FMI)和声波远探测对超压裂缝识别成效明显^[12-13],如何综合利用各种资料识别与预测超压裂缝的分布是解决烃源岩排烃问题的关键。鉴于此,笔者以超压发育的富油洼陷——渤南洼陷为例,通过岩心观察和测井资料分析,试图寻找超压环境下烃源层系内裂缝的测井识别标志,为预测超压盆地内油气的初次运移空间提供理论依据。

的初次运移空间提供理论依据。

1 研究区概况

渤南洼陷是沾化凹陷内埋深最大的次级负向构造单元,北以埕南断裂带与埕东凸起相接,南邻陈家庄凸起斜坡带,东以孤西断层与孤北洼陷、孤岛凸起相邻,东南以垦西地垒与三合村洼陷、孤南洼陷相接。渤南洼陷具有北陡南缓、东陡西缓的断陷盆地特征,受数条近东西向盆倾断层切割,从南到北依次存在南部缓坡带、渤深4断阶带、渤南深洼带和北部陡坡带(图1)。渤南洼陷沉积盖层主要为第三系,纵向上可分为孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组,其中沙河街组的沙三段和沙四上亚段作为主要的烃源层系普遍发育异常高压,压力系数最高可达1.8^[14],烃源层系发育大量的泥岩裂缝(如罗69井),而且存在着不同程度的油气显示^[15],表明烃源层系中裂缝对油气运移和储集的重要作用。

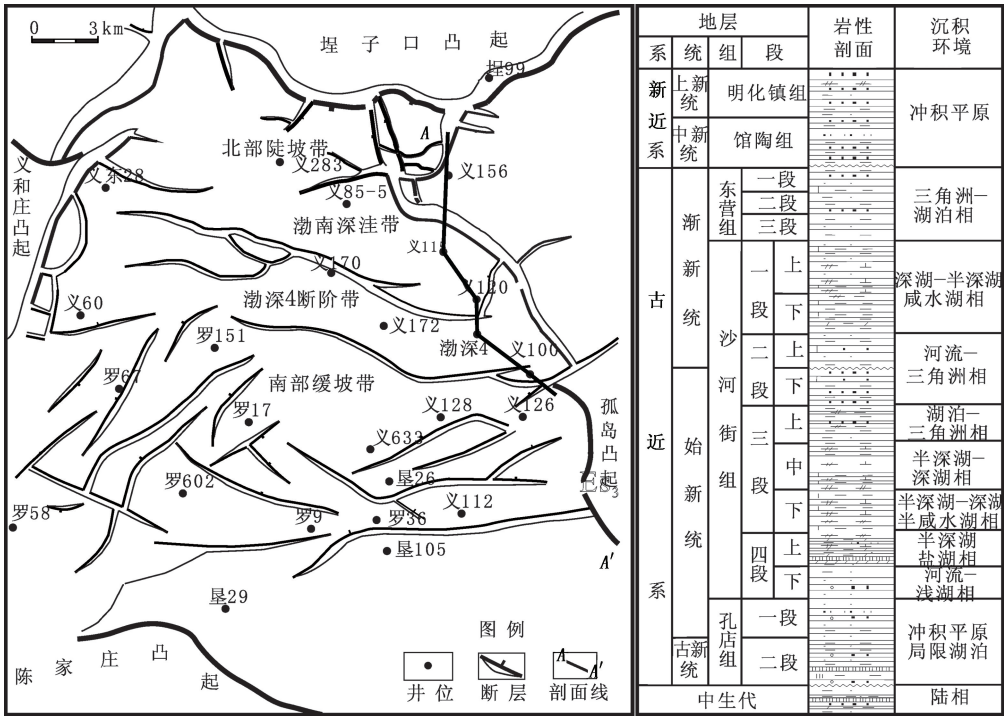


图1 沾化凹陷渤南洼陷构造单元划分和地层柱状图

Fig.1 Structural unit and lithologic column of Bonan sag, Zhanhua depression

2 超压源岩内裂缝发育特征

裂缝的成因类型较多,针对烃源层系内超压裂缝的研究相对较少。受控于成因机制的影响,超压裂缝在岩心观察和成像测井响应上均有较好的显示,可综合两者的信息对研究区超压裂缝进行判识,明确其发育特征。

2.1 岩心裂缝特征

为了分析异常高压环境下的裂缝发育特征,对沾化凹陷渤南洼陷区的沙三和沙四段烃源层系的岩心进行系统观察与统计。岩心观察表明,渤南洼陷泥质烃源层系内裂缝发育,规模大小不等、产状不一,且内部胶结程度以及充填物性质差别明显。整体表现为厚层烃源层系内所夹的砂岩及相邻砂岩中

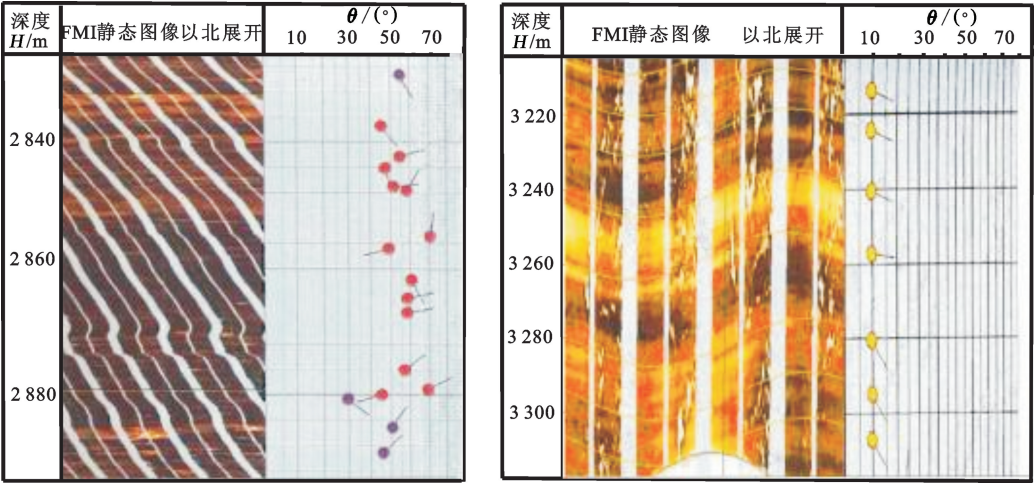


图 3 义东 301 井超压裂缝(左)、义 944 井构造裂缝(右)的成像测井显示特征示意图

Fig.3 General view of overpressure fractures in well Yidong301(left) and structural fractures in well Yi944 (right) signified by image forming logging

基于不同成因裂缝的特征差异,利用渤南洼陷现有的成像测井资料,筛选出与超压成因裂缝有关的发育井段。研究表明,超压成因裂缝在研究区大量存在,其中义 283 井的裂缝发育井段约为 4 240 m,裂缝倾角一般为 30°~50°,倾向杂乱;罗 69 井裂缝发育约为 3 010 m,裂缝倾角一般为 15°~65°,分

布范围广,倾向更为零乱,裂缝发育较为密集(图 4)。值得注意的是,部分超压裂缝由于规模小且后期闭合快,测井曲线识别能力较差,而这些裂缝的作用主要体现在源内油气的储集和运移,对油气的排烃指向和源外油气分布影响较低,因此本次研究不包括这部分微裂缝的识别。

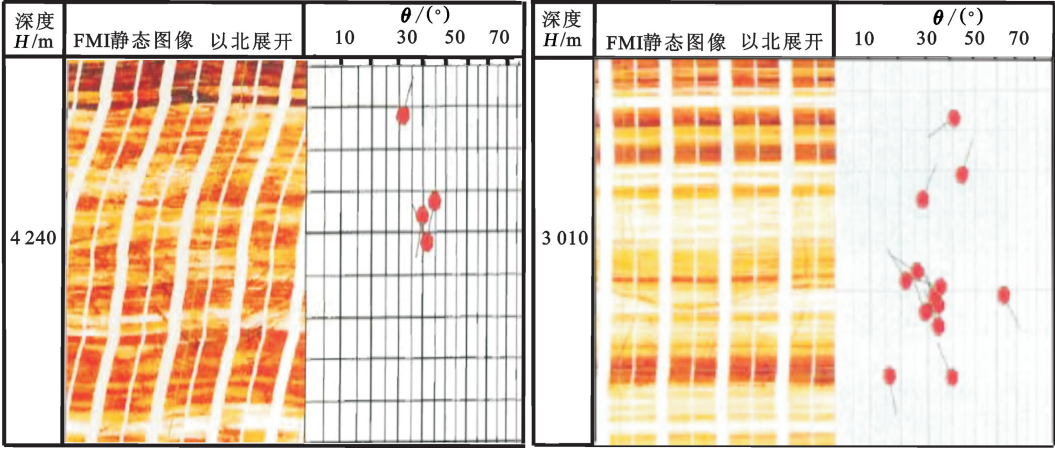


图 4 渤南洼陷单井成像测井资料识别超压裂缝

Fig.4 Overpressure fractures in image forming logging, Bonan sag

根据成像测井资料显示结果,纵向上超压裂缝分布具有不均的特征。如罗 69 井区在 2 500~3 000 m 的深度范围内零星发育 17 条超压裂缝,在 3 000~3 100 m 的深度范围内识别出 58 条超压裂缝,并且可细分为 3 个密集发育段,说明超压裂缝的形成存在优势发育区,具有一定的分布规律。

3 超压裂缝的测井响应特征及识别

3.1 测井响应特征

成像测井资料对于超压成因裂缝的识别意义重大,但是资料有限,而常规测井资料丰富可弥补这一

不足。利用岩心观察和成像测井资料识别的超压成因裂缝发育段作为研究对象,分析各类常规测井资料的响应特征,优选出区分效果较好且具有识别意义的常规测井类型及其组合,预测超压裂缝的分布。

结合超压裂缝发育段、岩性特征以及常规测井资料的分析,超压裂缝往往与大套泥岩相伴生,具有较高的自然伽马(GR)值。超压裂缝发育段的声波时差值明显高于趋势线,密度值降低,中子孔隙度略微增大,对孔隙度敏感的声波时差测井(AC)、密度测井(DEN)、补偿中子孔隙度测井(CNL)、浅侧向

电阻率测井(R_s)曲线会发生明显振荡,曲线的变化率均会出现高值。其中 AC 和 R_s 的振荡最为明显,AC 甚至出现周波跳跃,而密度曲线出现低值,这一变化规律在义 283 井、罗 69 井的裂缝发育段表现一致。义 283 井约在 4250 m 发育大量的超压裂缝,其 GR 值大于 120,AC 值明显高于趋势线,密度值降低,中子孔隙度略微增大,AC、DEN、 R_s 的变化率均

明显增加,表明裂缝的发育使得这些对孔隙度敏感的曲线发生了明显的振荡(图 5)。

根据上述常规测井的响应特征,对罗 69 井沙三段超压裂缝的发育段进行预测,在 2 500 ~ 3 200 m 的范围内预测出裂缝发育段 24 段,比成像测井识别的略多,两者的吻合率达到 80%(表 1),表明此方法可行。

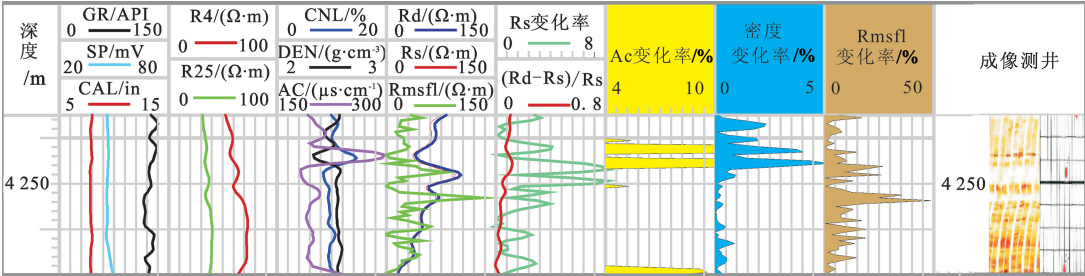


图 5 渤南洼陷义 283 井常规测井超压裂缝识别模式

Fig. 5 Pattern showing overpressure fractures identified by conventional logging of well Yi283, Bonan sag

表 1 渤南洼陷罗 69 井常规测井超压裂缝预测与成像测井裂缝识别对比

Table 1 Comparison of overpressure fractures by conventional logging predication with that signified by image forming logging in well Luo69

预测裂缝发育 深度 H/m	成像测井识别 裂缝条数	预测裂缝发育 深度 H/m	成像测井识别 裂缝条数	预测裂缝发育 深度 H/m	成像测井识别 裂缝条数
2 500 ~ 2 503	1	2 908 ~ 2 912	1	3 028 ~ 3 032	3
2 614 ~ 2 616	2	2 935 ~ 2 944	1	3 034 ~ 3 046	12
2 626 ~ 2 628	1	2 954 ~ 2 958	1	3 048 ~ 3 052	10
2 632 ~ 2 634	0	2 666 ~ 2 672	3	3 056 ~ 3 072	1
2 640 ~ 2 642	0	2 978 ~ 2 983	5	3 076 ~ 3 084	6
2 644 ~ 2 650	1	2 988 ~ 2 992	1	3 087 ~ 3 091	0
2 668 ~ 2 672	0	2 995 ~ 3 014	14	3 094 ~ 3 102	7
2 678 ~ 2 682	1	3 024 ~ 3 026	0	3 126 ~ 3 140	5

3.2 单井超压裂缝预测

根据超压裂缝的预测结果,发现泥质烃源层系内裂缝发育段具有分段集中分布的特征。如罗 69 井的预测结果表明,从 2 500 m 开始出现超压区到 4 000 m 高压发育区均有裂缝发育,裂缝集中发育于 3 个深度段,分别为 2 800 ~ 3 100 m(65 条)、3 700 ~ 4 000 m(45 条)和 3 400 ~ 3 700 m(40 条),其中埋深相对较浅的 2 800 ~ 3 100 m 的深度段裂缝密度最大,发育程度最高。

由于异常高压是裂缝形成的动力条件,而裂缝数量和规模则是超压形成裂缝能力的外在表现,因此两者之间存在一定的相关性。通过单井纵向压力结构与超压裂缝发育位置的标定可以看出,罗 69 井超压裂缝发育带多分布于现今地层压力系数大于 1.2 的岩层中,而义 283 井超压裂缝则发育在现今地层压力系数为 1.2 ~ 1.3 的岩层内(图 6)。深入分析发现,超压裂缝集中发育在压力系数急剧变化

的位置,即压力梯度最大的位置。

此外,超压裂缝的发育除了与压力梯度有关以外,还与地层压力的大小存在一定的联系。依据成像测井资料所识别出的超压裂缝密度与地层压力系数的对应关系分析,表明随着压力系数的增大,超压裂缝的发育密度也随之增加,超压裂缝密集带集中分布在地层压力系数为 1.2 ~ 1.5 的位置,只有当地层压力系数大于 1.2 时,超压裂缝发育密度才能达到 1 条/m(图 7)。

综上所述,地层压力系数为 1.2 ~ 1.5 时,可识别的超压裂缝大量发育,且分布于压力系数迅速增大的层系中。在压力系数较大且压力平稳分布的区域,超压裂缝虽发育,但数量和规模较低,测井资料可识别裂缝较少,这可能是因为当压力系数大于 1.5 时,周围较高的地层压力会使裂缝迅速闭合,难以维持裂缝的开启,因此可识别的超压裂缝不发育;而压力梯度急剧变化的地区则由于存在较大的压力

差,导致裂缝闭合能力下降,易保存下来形成高导缝,并容易被测井曲线识别出来。

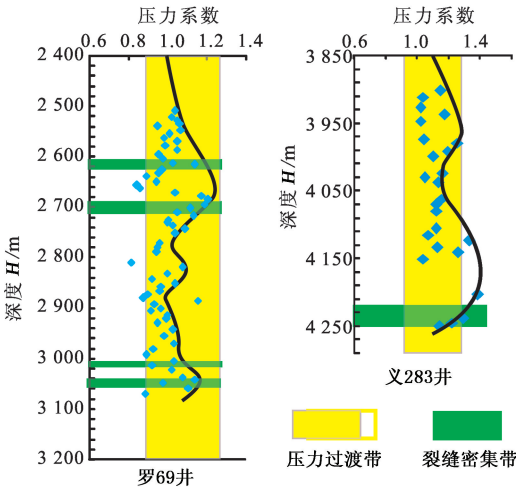


图 6 渤南洼陷罗 69 井(左)、义 283 井(右)超压裂缝纵向分布

Fig. 6 Distribution of overpressure fractures in well Luo69(left) and well Yi283(right), Bonan sag

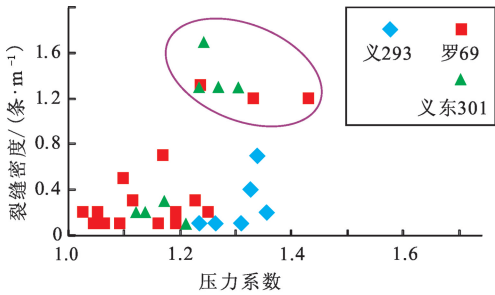


图 7 渤南洼陷泥质烃源岩裂缝发育密度与压力系数散点图

Fig. 7 Diagram showing relationship between fracture density and pressure coefficient in source rock, Bonan sag

4 超压裂缝发育带预测

为了明确超压裂缝发育带的空间分布,以义 100—渤深 4—义 120—义 115—义 156 剖面为例,利用常规测井预测方法对该剖面中的超压裂缝发育带进行预测。预测结果表明,超压裂缝带横向上具有一定的连续性,纵向上具有分段性。横向上,超压裂缝与超压封存箱的顶界面存在近似的平行关系,在控洼主断层间连续分布,受压力系数变化的影响,往往发育多套裂缝带。纵向上,超压裂缝带分布于压力系数大于 1.2 且压力系数急剧增高或下降的部位,以压力系数急剧增加部分的裂缝最为发育。受控于裂缝纵向延伸性的影响,裂缝带的宽度不等,一般压力系数变化幅度越大、压力系数越高的地方裂缝宽度越大,即裂缝规模越大,表明了开启动力条件

以及支撑裂缝开启的动力条件充足。在所预测的裂缝发育带内或其上下邻近的砂体部位分布着大量的油气藏(图 8),表明超压裂缝发育带在油气成藏过程中发挥着重要作用^[17-19]。超压裂缝可以明显提高泥质烃源岩的孔渗性,规模裂缝可以作为油气初次运移的通道,非规模裂缝可提高烃源岩的储油能力。根据超压裂缝的分布规律,可针对异常压力系统内不同的压力环境进行不同目标的勘探,建立找油的新思路。

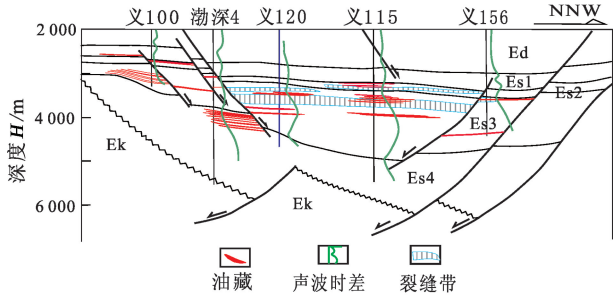


图 8 渤南洼陷超压裂缝发育预测带与油藏分布剖面

Fig. 8 Profile showing relationship between predicted overpressure fractures zones and reservoirs of Bonan sag

5 结 论

(1) 岩心观察显示渤南洼陷泥质烃源层系内裂缝发育,规模大小不等、产状不一,近超压系统顶部地区的观察裂缝发育数量多,开启程度高;而埋深大、压实作用较强的泥岩中肉眼可识别的裂缝发育数量较少,镜下可见大量的微裂缝,裂缝闭合程度高。

(2) 成像测井图像可区分泥质烃源岩中的构造裂缝、超压裂缝以及钻井诱导缝等,其中超压裂缝主要出现在大段暗色背景(泥岩响应)之中,以高角度、倾向杂乱或平行层理的高导缝存在,可作为识别的标志。

(3) 结合岩心观察与成像测井对超压裂缝的识别结果,可以建立常规测井识别超压裂缝的响应特征,即高声波时差、中子孔隙度、密度测井、地层真电阻率变化率和低自然伽马变化率的“四高一低”特征。

(4) 常规测井对超压裂缝发育带的识别结果显示,超压裂缝具有横向上连续,纵向上分带的特征,超压裂缝带往往分布于地层压力系数大于 1.2 且压力梯度变化急剧的区域;在压力系数大于 1.5 且压力变化相对平稳的区域,超压微裂缝多已闭合。

参考文献:

[1] LAW B E, SPEBCER C W. Abnormal pressure in hydrocarbon environments[J]. AAPG Memoir, 1998, 70(1): 1-

- 11.
- [2] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 马启富,陈斯忠,张启明,等. 超压盆地与油气分布[M]. 北京:地质出版社,2000.
- [4] WANG C, XIE X. Hydrofracturing and episodic fluid flow in shale-rich basins: a numerical study[J]. AAPG Bulletin,1998,82(10):1857-1869.
- [5] CAPUANO R M. Evidence of fluid flow in microfractures in geopressed shales[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(8):1303-1314.
- [6] HUNT J. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin,1990,74(1):1-12.
- [7] 张金功,梁志刚,李丕龙. 控制超压泥质岩裂隙开启的主要因素[J]. 地质论评,1996,42(增刊):124-129.
ZHANG Jingong, LIANG Zhigang, LI Peilong. Main factors of controlling opening of overpressured pelite fractures[J]. Geologic Review,1996,42(sup):124-129.
- [8] 黄志龙,马剑,吴红烛,等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油流体压力与初次运移特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(5):7-11.
HUANG Zhilong, MA Jian, WU Hongzhu, et al. Fluid pressure and primary migration oil of Lucaogou formation in characteristics of shale Malang sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(5):7-11.
- [9] 李传亮,张景廉,杜志敏. 油气初次运移理论新探[J]. 地学前缘,2007,14(4):132-142.
LI Chuanliang, ZHANG Jinglian, DU Zhimin. New viewpoints of the primary migration of oil and gas[J]. Earth Science Frontiers,2007,14(4):132-142.
- [10] 罗群. 泥岩压实动态分析法定量评价石油初次运移[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):71-73.
LUO Qun. Quantitatively evaluating hydrocarbon primary migration by mudstone compaction dynamic analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002,29(2):71-73.
- [11] 丁文龙,许长春,久凯,等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展,2011,26(2):135-144.
DING Wenlong, XU Changchun, JIU Kai, et al. The research progress of shale fractures[J]. Advances in Earth Science, 2011,26(2):135-144.
- [12] 何生,何治亮,杨智,等. 准噶尔盆地腹部侏罗系超压特征和测井响应以及成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2009,34(3):457-470.
HE Sheng, HE Zhiliang, YANG Zhi, et al. Characteristics, well-Log responses and mechanisms of overpressures within the Jurassic formation in the central part of Junggar Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2009,34(3):457-470.
- [13] 朱文娟. 成像测井资料在裂缝识别中的应用[J]. 石油仪器,2009,23(3):45-48.
ZHU Wenjuan. Application of imaging well logging data to fracture distinguishing[J]. Petroleum Instruments, 2009,23(3):45-48.
- [14] 谢启超,刘震,白海峰. 渤南洼陷超压形成及演化历史分析[J]. 新疆石油学院学报,2004,16(1):12-15.
XIE Qichao, LIU Zhen, BAI Haifeng. Analysis of the generation and evolution of overpression of Bonan sag[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004,16(1):12-15.
- [15] 邓美寅,梁超. 渤南洼陷沙三下亚段泥页岩储集空间研究:以罗69井为例[J]. 地学前缘,2012,19(1):173-181.
DENG Meiyin, LIANG Chao. Studies on reservoir space of mud stone and shale of the lower section of Es3 in Bonan Sub-sag: an example from well Luo 69[J]. Earth Science Frontiers,2012,19(1):173-181.
- [16] 刘庆,张林晔,沈忠民,等. 东营凹陷富有机质烃源岩顺层微裂缝的发育与油气运移[J]. 地质论评,2004,50(6):593-598.
LIU Qing, ZHANG Linye, SHEN Zhongmin, et al. Microfracture occurrence and its significance to the hydrocarbons expulsion in source rocks with high organic matter abundance Dongying depression[J]. Geological Review, 2004,50(6):593-598.
- [17] PRICE L C, WENGER L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1992,19:141-159.
- [18] 胡济世. 异常高压、流体压裂与油气运移(上)[J]. 石油勘探与开发,1989,16(2):16-23.
HU Jishi. Abnormal pressure, fluid fracture, and migration of oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development,1989,16(2):16-23.
- [19] 陈中红,查明. 断陷湖盆超压分布特征及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报,2008,29(4):509-514.
CHEN Zhonghong, ZHA Ming. Distribution characteristics of overpressure and its controlling to hydrocarbon accumulation in terrigenous faulted basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(4):509-514.

(编辑 徐会永)