

东濮凹陷三叠系致密砂岩储层裂缝与油气成藏

王萍霞¹, 巩磊^{2,3}, 杜宜静⁴, 高帅², 翁剑桥³, 苏惠¹, 黄建国²

1. 中国石油化工股份有限公司中原油田勘探开发研究院, 濮阳 457001
2. 东北石油大学地球科学学院, 大庆 163318
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 根据露头、岩心、薄片观察、成像测井、声发射实验、包裹体测温、原油族组成、原油组分碳同位素分析等技术,在分析裂缝分布特征和成藏特征的基础上,探讨了东濮凹陷北部三叠系裂缝形成期次与油气成藏的匹配关系。研究认为,研究区以构造裂缝为主。裂缝及其溶蚀孔洞的孔隙度平均为2.25%,渗透率为 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,是主要的储集空间和渗流通道。三叠系致密砂岩储层裂缝主要分两期形成,分别为燕山运动期和喜马拉雅运动期。三叠系储层油源为古近系沙三段和沙四段烃源岩,其生烃高峰期主要为东营组沉积末期—馆陶组沉积时期(晚期裂缝形成时期),而造成三叠系砂岩致密的压实、胶结等成岩作用主要在新生代以前完成。油气生成时期与喜马拉雅期有效裂缝的形成时间匹配良好,而与基质孔隙的发育匹配关系较差,从而造成研究区裂缝含油,砂岩的基质孔隙基本不含油。

关键词 东濮凹陷;纯裂缝型储层;油气成藏

中图分类号 TE112

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.010

Relationship Between Fractures and Hydrocarbon Accumulation of Triassic Tight Sandstones in the North of Dongpu Depression

WANG Pingxia¹, GONG Lei^{2,3}, DU Yijing⁴, GAO Shuai², WENG Jianqiao³, SU Hui¹, HUANG Jianguo²

1. Research Institute of Exploration & Development, Zhongyuan Oilfield Company, Sinopec, Puyang 457001, China
2. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

Abstract The distribution of the natural fractures controls the distribution and the accumulation of the hydrocarbon reservoir in the Triassic of Wenmingzhai area, Dongpu depression. The formation time of the fractures and the relationship between the effective evolution law and the hydrocarbon generation peak determine the behavior of the hydrocarbon reservoir. Based on the data of outcrops, cores, thin sections, logs, sound emission experiments, fluid inclusion analyses, oil component analyses and carbon isotope analyses, the distribution characteristics of the fractures, the fracture sequence and the relationship between the fractures and the hydrocarbon accumulation are discussed. The results show that the structural fracture is the dominant fracture type in the reservoirs of Triassic tight sandstone in the north of Dongpu Depression. The average porosity of the fractures and the related dissolved pores is 2.25%, and the average permeability is about $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The fractures and the related dissolved pores are important storage spaces

收稿日期:2014-04-14;修回日期:2014-05-04

基金项目:油气资源与探测国家重点实验室重点基金项目(PPDX2008-07)

作者简介:王萍霞,工程师,研究方向为油气勘探开发,电子信箱:1244496071@qq.com;巩磊(通信作者),讲师,研究方向为应力场分析和储层裂缝形成、分布及预测,电子信箱:kcgonglei@foxmail.com

引用格式:王萍霞,巩磊,杜宜静,等.东濮凹陷三叠系致密砂岩储层裂缝与油气成藏[J].科技导报,2014,32(22):62-66.

and seepage channels. The fractures of the tight sandstone reservoir of Triassic are formed in two stages. The oil sources of Triassic are the source rocks of Sha3 and Sha4 Member of Palaeogene whose peak period of the hydrocarbon generation is the period when the Dongying-Guantao Formation is formed. But the diagenesis was completed before Cenozoic. The period of the hydrocarbon generation is well matched with the effective fractures, while it is poorly matched with the pores. It follows that the oil is contained in the fractures rather than in pores. The distribution of oil reservoirs is controlled by the development of fractures and high part of the structure.

Keywords Dongpu depression; pure fractured reservoirs; hydrocarbon accumulation

东濮凹陷北部文明寨地区三叠系为纯裂缝型致密砂岩油气藏,储层物性极差,平均孔隙度仅为2.15%,且基质孔隙不含油,但是其天然裂缝十分发育,油气主要储集在裂缝及其相伴生的溶蚀孔洞中,缝洞系统为油气的有效储集空间^[1-6]。天然裂缝的分布控制了文明寨地区三叠系油气藏的分布和聚集,而裂缝的形成时期及其有效性演化规律与烃源岩生排烃高峰的匹配关系决定了油气藏能否有效形成。因此,开展研究区储层裂缝分布特征、形成时间及其与成藏的匹配关系研究,对明确研究区油气藏的控制因素、分布规律及勘探潜力具有重要意义。

1 地质背景

东濮凹陷三叠系致密砂岩潜山油气藏位于东濮凹陷中央隆起带的北部,是在古近系油气田下部发现的新的潜山含油气层^[1-6]。研究区主要发育北东东向和北北东向正断层,把该区切割成北北东向展布的地堑地垒相间的构造格局,地垒构造主体控制了三叠系潜山油气藏的分布。三叠系厚800~950 m,自下而上进一步划分为刘家沟组、和尚沟组和二马营组(图1)。勘探成果表明,含油地层主要分布在二马营组,和尚沟组仅在W77断块区的高部位见到油层,刘家沟组未见油层。二马营组、和尚沟组地层为紫红色泥岩、棕红色粉砂岩、灰质粉砂岩不等厚互层,顶部见棕红色砾岩、细砂岩。储层基质孔隙度平均为2.15%,渗透率平均为 $0.184 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔特低渗透致密储层。根据岩心观察,砂岩中裂缝与溶蚀孔洞共存,砂岩裂缝、缝洞含油,砂岩基质不含油,其油气的有效储集空间为缝洞系统。

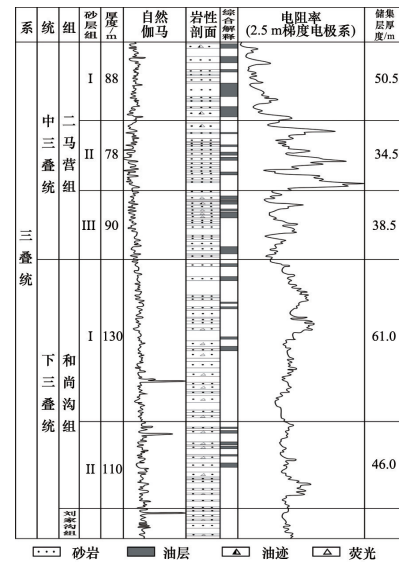


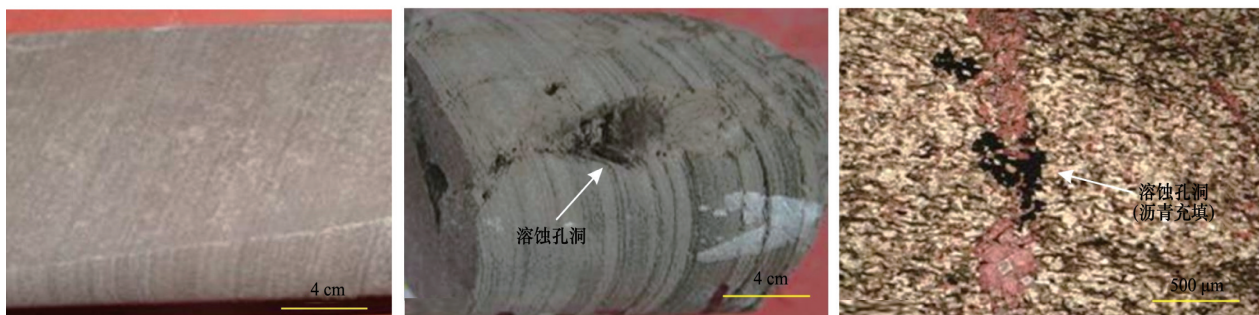
图1 三叠系综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of Triassic

2 裂缝分布特征

2.1 裂缝类型及特征

根据7口井358 m岩心、132块薄片以及12口井的成像测井资料和露头观察,构造裂缝和成岩裂缝是东濮凹陷北部文明寨地区三叠系致密砂岩储层的主要裂缝类型,其中以高角度构造裂缝为主。构造裂缝广泛分布在三叠系致密砂岩储层的各种岩性中,其规模较大,裂缝高度分布在10~60 cm。大多数构造裂缝表现为小型正断层或张开型裂缝。小断层的位移从几毫米到数厘米(图2(a))。



(a) 构造裂缝(小断层),W57井,二马营组,细砂岩,2850 m (b) 溶蚀孔洞,W77-4井,二马营组,泥质条带细砂岩,2873m (c) 溶蚀孔洞(沥青充填),单偏光,50×,W77-3井,二马营组,细砂岩,2842m

图2 构造裂缝及溶蚀孔洞

Fig. 2 Structural fractures and its related dissolved pores

根据岩心和薄片裂缝充填程度观察,只有不到10%的裂缝被石英或方解石等矿物全充填,而且沿裂缝发生了明显的溶蚀作用(图2(b)、(c)),溶蚀孔洞一般小于3 cm,溶蚀孔洞的存在使储层的储集性能变好。

2.2 裂缝分布规律及对储层贡献

根据成像测井资料以及微层理面定向后裂缝产状统计,东濮凹陷北部三叠系致密砂岩储层裂缝主要为北北东-南南西向、东西向和近北东-南西向3组。在平面上,岩层厚度和岩性控制了裂缝的发育程度,其中在薄层粉砂岩中裂缝最发育,其次是细砂岩,泥岩中裂缝不发育^[7-9]。在纵向上,裂缝发育程度与埋深有关,深度越大,裂缝越不发育,如二马营组2砂组中裂缝发育程度明显大于1砂组。

根据7口井岩心裂缝开度测量和12口井成像测井计算^[10],研究区裂缝开度为20~100 μm,平均32 μm。裂缝及其伴生溶蚀孔洞的孔隙度为1.5%~6.0%,平均为2.25%,说明裂缝及其溶蚀孔洞是原油的主要储集空间。裂缝渗透率一般小于 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大可达 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该数值远远大于储层基质的渗透率,说明裂缝系统控制了该区致密砂岩储层油气流动规律。

2.3 裂缝形成期次

根据露头、岩心及微观薄片裂缝的分布形式、裂缝间的切割和限制关系、裂缝充填物包裹体均一温度分析以及岩石Kaiser效应试验,研究区构造裂缝主要分两期形成。

根据河南登封野外露头观察,研究区断层型裂缝和节理型裂缝均十分发育,根据断面两侧相对位移方向,又可将断层型裂缝分为逆断层型裂缝和正断层型裂缝两类,说明它们不是在同一构造应力场下形成的,即反映它们是分两期形成的。根据岩心和薄片裂缝的充填切割关系的观察,具有明显的一组裂缝切割另一组裂缝的现象,以及在同一口井的岩心上同时具有逆断层型裂缝和正断层型裂缝的现象,这些都说明研究区的构造裂缝主要在两期形成。

根据文明寨地区3口井20多块样品的岩石声发射实验分析,各个样品上都可以识别出3个主要的Kaiser效应点(图3),剔除现今地应力场作用造成的Kaiser效应点以外,其余2次为地质历史时期由于古构造运动产生的构造应力场作用的产物,反映了研究区岩石在地质历史时期中经历了两次微破裂事件。根据裂缝充填物包裹体分析,可以划分出两个充填期次(图4),流体包裹体均一温度主要分布在100~110℃(第1期)、120~130℃(第2期)2个区间,说明该区构造裂缝是分两期形成的。结合三叠系埋藏史曲线(图5),第1期破裂事件发生在古新世早期,第2期破裂事件发生在始新世-渐新世。

根据上述研究,结合研究区构造演化史和地层埋藏史分析^[3-5, 11-14],东濮凹陷北部三叠系主要存在2个断裂期:燕山运动期和喜马拉雅运动期,与之相伴的裂缝形成也有两期。第1期构造裂缝在燕山期的水平构造挤压和抬升剥蚀联合作用下形成,主要以东西向剪切裂缝为主,而北西向裂缝不发

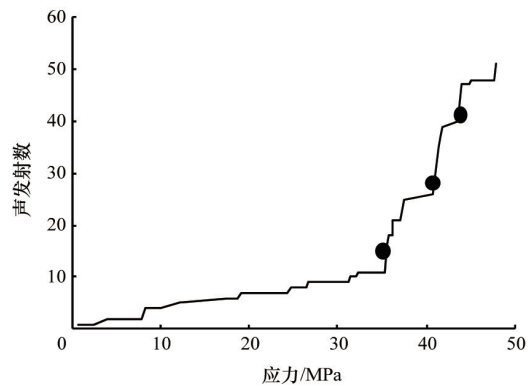


图3 岩石声发射AE响应曲线

Fig. 3 Response curve of rock acoustic emission tests

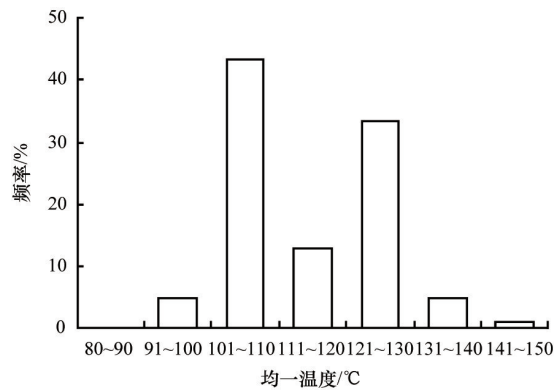


图4 裂缝充填物流体包裹体均一温度

Fig. 4 Homogenization temperature of fluid inclusions in structural fractures

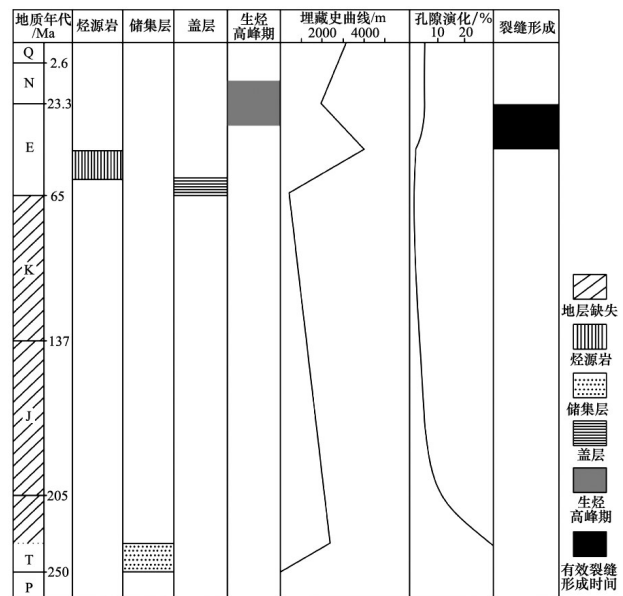


图5 有效裂缝形成时间与油气成藏匹配关系

Fig. 5 Match relationship between formation time of effective fractures and hydrocarbon accumulation

育,该时期形成的裂缝绝大部分已经被矿物全充填。第2期构造裂缝形成于古近纪末期(喜马拉雅运动期)。其中第2期(喜马拉雅期)构造裂缝的形成又经历了两个阶段:1)始新世—渐新世为盆地裂陷发展阶段,在拉张应力场作用下形成了北北东向断层型裂缝;2)东营组末期,在构造反转作用下,形成了大量构造裂缝,裂缝走向主要为北东向,该时期形成的构造裂缝几乎未被充填,是油气主要的储集空间。

3 油藏特征

东濮凹陷北部文明寨地区三叠系主要有明471断块区和卫77断块区两个含油区块。油藏受砂岩裂缝和构造双重因素控制,其中裂缝及伴生其溶蚀孔洞为油气的储集空间,裂缝明显含油,而砂岩基质孔隙不含油;构造控制油藏的聚集和分布,构造高部位油气富集,向低部位逐渐过渡为水层,不同断块以及同一断块的不同砂组具有不同的油水系统,如,明471断块区油藏埋深1920~2500 m,油水界面深度2250~2350 m;卫77断块区油藏埋深2550~2800 m,油水界面深度2725~2875 m。由此可见,文明寨地区油藏类型为砂岩裂缝型构造层状油藏。

根据文明寨地区三叠系10口井13个层的试油测压资料,原始地层压力为19.5~29.0 MPa,地层压力系数为1.0左右,原始饱和压力12.8 MPa,地层温度77.5~105℃,属于正常的温度和压力范围。根据卫77断块区和明471断块区13口井取样分析结果,文明寨地区三叠系地面原油密度0.871~0.919 g/cm³,平均0.895 g/cm³,地面原油黏度33.9~119.7 mPa·s,凝固点23~31℃,与文明寨古近系原油性质一致。地层原油密度0.798 g/cm³,地层原油黏度3.27 mPa·s,原始气油比61.21 m³/m³,原油体积系数1.1791,与卫城地区和文明寨地区古近系沙三下—沙四段烃源岩的原油性质相近,属中质常规原油。地层水矿化度一般在86753~117563 mg/L,氯离子质量浓度为51748~69179 mg/L,水型为MgCl₂和CaCl₂,地层水pH值6.0~7.1,地层水密度1.061~1.105 g/cm³。

4 裂缝形成与油气成藏的匹配关系

文明寨地区三叠系原油主要来自于与之相接触的沙三段和沙四段烃源岩,而沙三段和沙四段烃源岩的生排烃高峰期主要为东营组沉积末期—馆陶组沉积时期^[3]。研究区构造裂缝主要是在燕山运动期晚期和喜马拉雅运动中、晚期形成的。燕山运动期晚期形成的构造裂缝经历了长时间的成岩作用,被矿物充填严重,有效性变差;东营组沉积末期是研究区构造裂缝的主要形成时期,该时期形成的裂缝数量多,且未被充填,有效性好,裂缝系统为油气运移提供了渗流通道,并且是主要的储集空间。根据研究区三叠系砂岩储层的成岩分析,造成三叠系砂岩致密低渗透的压实、胶结等成岩作用主要在新生代以前完成^[3,15,16],即三叠系砂岩沉积以后,受后期强烈的成岩作用影响,在新生代以前就已经致密化,成为特低孔特低渗致密储层,这远远早于古近系烃源岩

的生排烃高峰期。因此,由于研究区油气的形成和运移时期与有效裂缝的形成时间匹配良好,而与基质孔隙的发育匹配关系较差(图5),因此,古近系沙三和沙四段烃源岩生成的原油主要沿三叠系地层两侧的断层和裂缝系统运移至裂缝中聚集成藏,而此时基质孔隙的孔隙度和渗透率很低,油气难以运移进去,因而表现为原油主要储集在裂缝中,而基质孔隙中基本不含油。

根据目前单井测试资料和生产资料显示^[9],油气藏主要聚集在三叠系的上部或顶部。文明寨地区油层分布于三叠系二马营组的I、II、III砂组,和尚沟组I段也有个别井揭示有油层,含油井段达300 m。因此,裂缝的发育程度决定了油气藏的聚集。平面上油气藏聚集在中生界潜山构造的高部位,由高部位至低部位逐渐过渡为油水层和水层。在不同的断块和砂组中,存在不同的油水界面,反映是受构造控制的层状裂缝型储层。

5 结论

1) 东濮凹陷北部三叠系裂缝性致密砂岩储层发育有构造裂缝和成岩裂缝,以构造裂缝为主。裂缝及其溶蚀孔洞的孔隙度平均为2.25%,渗透率为40×10⁻³ μm²左右,是主要的储集空间和渗流通道。

2) 文明寨地区三叠系油藏的聚集和分布明显受构造控制,原油富集区主要分布在地垒构造的高部位。在薄层粉砂岩中裂缝最发育,其次是细砂岩,泥岩中裂缝不发育。在纵向上,不同砂组裂缝发育程度差异较大,随着深度的增加,裂缝发育程度降低。

3) 东濮凹陷北部三叠系砂岩裂缝主要分两期形成,早期裂缝被矿物充填严重,有效性变差;晚期有效裂缝(东营组末期)与油源生烃高峰期匹配良好,而此时砂岩已致密化,从而造成裂缝含油,基质孔隙不含油。

参考文献(References)

- [1] 赵良金, 杨广林, 王瑞飞, 等. 东濮凹陷裂缝性砂岩油气藏主控因素及成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 196-202.
Zhao Liangjin, Yang Guanglin, Wang Ruifei, et al. Key controlling factors and reservoir forming model of the fractured sandstone reservoirs in Dongpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 196-202.
- [2] Zeng L B, Su H, Tang X M, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: A new play type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363-377.
- [3] 苏惠. 东濮凹陷北部中生界砂岩裂缝型油气藏分布规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1-12.
Su Hui. Distribution of Mesozoic fractural sandstone reservoirs in North Dongpu depression[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 1-12.
- [4] 陈书平, 漆家福, 王德仁, 等. 东濮凹陷断裂系统及变换构造[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 43-49.
Chen Shuping, Qi Jiafu, Wang Deren, et al. Fault systems and transfer structures in Dongpu Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 43-49.

- [5] 周新科, 许化政. 东濮凹陷地质特征研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 20-26.
Zhou Xinke, Xu Huazheng. Discussion on geological features of Dongpu Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 20-26.
- [6] 赵俊峰, 纪友亮, 陈汉林, 等. 电成像测井在东濮凹陷裂缝性砂岩储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 383-390.
Zhao Junfeng, Ji Youliang, Chen Hanlin, et al. Application of EMI in evaluation of fractured sandstone reservoirs in the Dongpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 383-390.
- [7] 沈万杰, 苏惠, 巩磊, 等. 东濮凹陷三叠系砂岩潜山油气藏裂缝特征[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 19-21.
Shen Wanjie, Su Hui, Gong Lei, et al. Fracture characteristics of buried-hill reservoirs of Triassic sandstone in the north of Dongpu Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(4): 19-21.
- [8] 曾联波, 巩磊, 祖克威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1809-1814.
Zeng Lianbo, Gong Lei, Zu Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleocene reservoir, western Tsaidam Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1809-1814.
- [9] 曾联波, 高春宇, 漆家福, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(S1): 41-47.
Zeng Lianbo, Gao Chunyu, Qi Jiafu, et al. Seepage and distribution of fractures in the ultra-low permeability sandstone reservoirs of Longdong area Ordos basin[J]. Science in China, Series D: Earth Science, 2008, 38(S1): 41-47.
- [10] 曾联波, 柯式镇, 刘洋. 低渗透储层裂缝研究方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 14-37.
Zeng Lianbo, Ke Shizhen, Liu Yang. Research methods for fractures in the low-permeability reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 14-37.
- [11] 夏斌, 刘朝露, 陈根文. 渤海湾盆地中新生代构造演化与构造样式[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 57-60.
Xia Bin, Liu Chaolu, Chen Genwen. Meso-Cenozoic tectonic evolution and tectonic styles in the Bohai bay basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 57-60.
- [12] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 845-851.
Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851.
- [13] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(S1): 1-6.
Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay basin province[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1995, 19(S1): 1-6.
- [14] 张亚敏, 吕延仓, 徐林丽, 等. 东濮凹陷兰聊断裂带构造演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 57-60.
Zhang Yamin, Lü Yancang, Xu Linli, et al. Structural evolution and hydrocarbon exploration of Lanliao fault belt in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 57-60.
- [15] 苏惠, 曲丽萍, 张金川, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷天然气成藏条件与富集规律[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 123-128.
Su Hui, Qu Liping, Zhang Jinchuan, et al. The reservoir-forming condition and enrichment rule of the natural gas in the Dongpu depression, the Bohaiwan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 123-128.
- [16] 李忠, 寿建峰, 王生朗. 东濮凹陷砂岩储层成岩作用及其对高压致密气藏的制约[J]. 地质科学, 2000, 35(1): 96-104.
Li Zhong, Shou Jianfeng, Wang Shenglang. Diagenesis of sandstone reservoirs: Constraints on high-pressure tight gas deposits in Dongpu depression, north China[J]. Scientia Geology Sinica, 2000, 35(1): 96-104.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



李源潮勉励《知识就是力量》点燃青少年科学梦想

2014年7月25日, 中共中央政治局委员、国家副主席李源潮到《知识就是力量》杂志社调研, 他指出, 要深刻领会习近平总书记“知识就是力量, 人才就是未来”的重要思想, 大力传播科学知识, 点燃青少年的科学梦想。

李源潮说, 科学的未来在青少年, 希望《知识就是力量》把青少年作为第一服务对象, 根据他们的成长特点和求知心理, 增强杂志的针对性和吸引力, 努力成为点燃青少年科学梦想的火炬, 成为传播科学知识的窗口, 成为弘扬科学精神的阵地, 成为推进科普信息化的先锋, 成为培养集聚科普人才的基地, 为推动科普事业发展、加快建设创新型国家作出应有贡献。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15804181.html>。