

高邮凹陷深层系有效储层形成控制因素

秦伟军,李娜,付兆辉

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:高邮凹陷发育上、中、下三套含油气系统,深层系油藏属于下含油气系统。通过对深层系成藏基本特征及有效储层发育关键控制因素的研究,取得系统认识。下含油气系统成藏条件表现为“上生下储”特点,即上部阜宁组二段生成的油气,在异常高压条件下下排进入阜宁组一段储层。阜一段储层主要为三角洲前缘亚相沉积,砂体发育,但整体表现为低孔、低渗特点。研究认为,沉积微相、埋深与成岩、异常高压与油气充注三者控制了深层有效储层的发育;水下分流河道和河口坝是有效储层发育的有利微相;储层处于晚成岩 A1 期,次生孔隙发育改善了储集条件;深层系存在异常高压层有利于油气充注,油气充注时间早于砂岩致密化时间,有利于储集空间保存。其中,有利的沉积微相和发育次生孔隙带是决定深层发育有效储层的主要因素。

关键词:次生孔隙;有效储层;深层系;高邮凹陷

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Factors controlling formation of effective reservoirs in deep of the Gaoyou Sag

Qin Weijun, Li Na, Fu Zhaohui

(Petroroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: There developed three petroleum systems in the Gaoyou Sag, Subei Basin, including the upper, the middle and the lower petroleum system. The deep reservoirs belong to the lower petroleum system. The basic characteristics of hydrocarbon accumulation and the key factors controlling the formation of deep reservoirs are studied. Hydrocarbon accumulation in the lower petroleum system features in “upper source rock-lower reservoir”. That is, hydrocarbons sourced from the upper E_2f^2 migrated downward into the E_1f^1 under abnormal high pressure. The E_1f^1 reservoirs are mainly delta front sands with large volume but low porosity and low permeability. The result shows that development of the deep effective reservoir was controlled by sedimentary microfacies, burial depth and diagenesis as well as abnormal pressure and hydrocarbon charging. Underwater distributary channel and mouth bar are favorable sedimentary microfacies for effective reservoirs; The reservoirs are in the late diagenetic stage A1 and the secondary pores improved reservoir quality; The abnormal high pressure in the deep reservoirs is favorable for hydrocarbon charging, and the charging is earlier than sandstone densification, being conducive to reservoir space preservation. Among these factors, the favorable sedimentary microfacies and the development of secondary pore zone are the main factors controlling the development of deep effective reservoirs.

Key words: secondary pore, effective reservoir, deep layer series, Gaoyou Sag

深层勘探领域储层有效性研究是储层地质学研究的重点课题。过去 10 年,中国东部古近系和新近系断陷盆地主要勘探方向是构造-岩性、地层-岩性等隐蔽油气藏领域,探明地质储量持续增加,但以中、高渗储层为主。近期的勘探发现表明,深层具有规模增储潜力,是未来勘探的重点,但普遍面临低渗透勘探对象,在勘探难度增加的同时,也影响了储量经济性。目前对形成深层有效储层控制因素的认识还不深入,油田地质工作者从不同的侧面开展研究。

高邮凹陷是中国东部古近系和新近系断陷盆地群

中油气较富集的凹陷之一,随着中浅层勘探程度的提高,勘探工作往深层等领域拓展已成为必然。但是深层有其自身的有利条件和不利因素,整体表现为低孔低渗特点。因此,选准其作为研究对象,探讨其有效储层形成的控制因素,对指导该凹陷勘探有重要的现实意义,同时对其他类似盆地也有借鉴作用。

1 深层油气地质条件

高邮凹陷位于苏北盆地东台坳陷中部,形成于晚

白垩世征运动,历经吴堡、三垛等多次构造运动,构造格局呈南断北超、南陡北缓的箕状凹陷特点^[1],最大埋深为6 500 m。按构造单元由南向北依次划分为南部断裂带、中央深凹带和北部斜坡带。高邮凹陷主要沉积地层自下而上发育上白垩统泰州组、古新统阜宁组、始新统戴南组、三垛组、新近系盐城组和第四系东台组。

高邮凹陷主要发育两套有利的成熟烃源岩:阜(阜宁组)四段和阜二段。泰州组二段也有一定的生烃潜力,但不是主要的烃源岩。阜四段和阜二段烃源岩形成了阜四段-戴南组、三垛组的上含油气系统和阜二段-阜三段的中含油气系统以及阜一段-阜二段的下含油气系统。上含油气系统和中含油气系统一般埋深小于3 000 m,称为中浅层,是目前勘探的主力层。下含油气系统埋深普遍大于3 000 m,称为深层,目前勘探程度较低。深层(阜一段-阜二段下含油气系统)油气地质条件表现为“上生下储”的特点,即上部阜二段生成的油气,下排进入阜一段成藏。因此,阜一段为深层主要储层。

1) 油源条件

阜二段为一套深湖相沉积,干酪根类型以Ⅱ₁型为主,其次为Ⅰ型;有机碳含量平均值为2%,氯仿沥青“A”含量平均值为0.2%,岩石热解生烃潜量($S_1 + S_2$)值($1\ 000 \sim 1\ 500$) $\times 10^{-6}$;埋深已超过生烃门限深度。从有机质的类型、丰度和成熟度来看,阜二段深层油源条件较好。

2) 储层与储盖组合条件

阜一段沉积时期处于浅水三角洲,物源主要来自西北部建湖隆起甚至更远的地区,北斜坡古地形坡度较缓,该物源供给充分,砂体较发育。阜二段泥岩厚250~300m,区域分布稳定,既是良好的生油层又是良好的区域盖层。储盖组合为以阜二段泥岩为盖层、阜一段砂岩为储层的储盖组合。

3) 成藏模式

高邮凹陷北部斜坡内带深层断块圈闭发育,深层油气主要来自于阜二段成熟烃源岩,其生成的油气下排进入阜一段砂岩储层,然后通过阜一段砂岩侧向运移和断层的纵向调节,进入断块圈闭聚集成藏。

2 有效储层特征

有效储层指的是孔隙度和渗透率值达到储量起算标准的储层。多年来的储量研究表明,孔隙度下限值为8%,渗透率下限值为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 是该区储量起算标准^[2-4]。

2.1 砂体展布特征

阜一段沉积时期,高邮凹陷发育三大方向、三个物

源体系的三角洲砂体。一是东北部沙埕三角洲砂体(图1)。呈北东-南西向展布,并延伸至凹陷主体区。砂岩厚度100~200 m,砂岩厚度一般为地层厚度的30%~45%,是凹陷深层主力砂体。二是西部天长三角洲砂体。在西部整体由北向南展布,砂岩厚度一般为100~200 m,砂岩厚度为地层厚度的35%~40%。三是南部砂体。整体沿南部边界断层呈雁列式分布,由4个朵状砂体组成,由南向北延伸,其中富民西砂体最大,端部已与西部砂体交汇;富民砂体及富民东部砂体较小。南部砂岩厚度一般为100~300 m,厚度横向变化最大,砂岩厚度为地层厚度的30%~50%。

整体上,东北部物源形成的北东方向砂体是深层的主要砂体。西部和南部砂体物源规模小、延伸短而急促,是次要砂体^[5]。

2.2 岩性特征

阜一段主要沉积相为三角洲前缘和滨浅湖亚相。砂岩主要为长石岩屑质石英粗粉砂岩、细砂岩和中砂岩,少部分为长石质岩屑砂岩。砂岩分选中-好,主要粒径范围为0.03~0.50 mm。碎屑成分中石英含量为58%~66%,长石含量为16%~20%,岩屑含量为16%~25%。岩屑主要包括火成岩岩屑、沉积岩岩屑和变质岩岩屑,所占比例大致相当。胶结物以钙质和云质为主,硅质次之。三个物源体系形成的砂体中,东北部三角洲砂体石英含量最高,分选性最好,也证实是深层主物源砂体^[6-7]。

2.3 物性特征

2.3.1 储层孔隙类型

阜一段储层具有原生孔隙和次生孔隙两种类型。

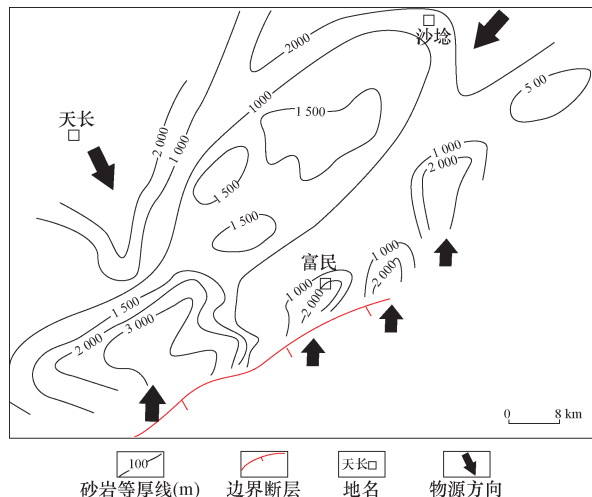


图1 高邮凹陷阜一段三角洲砂体展布

Fig. 1 Distribution of the E₁f₁ delta sand body in the Gaoyou Sag

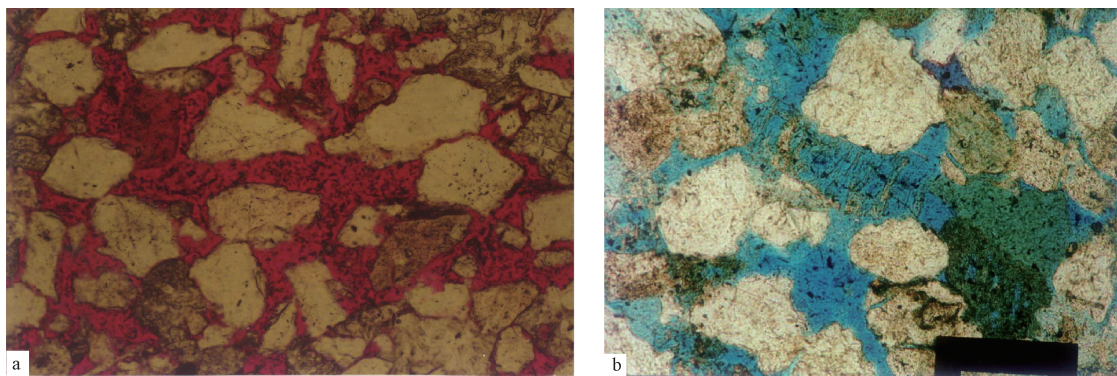


图2 高邮凹陷阜一段储层孔隙类型

Fig. 2 Pore types in the E_{1J^4} delta sand body in the Gaoyou Sag

a. 粒间孔,沙X26井,埋深2 223 m,红色铸体;b. 长石溶解残余,沙19-1井,埋深2 254 m,蓝色铸体

整体上,随着埋深加大,原生孔隙所占比例逐渐减少,次生孔隙逐渐增加。根据铸体薄片和扫描电镜分析,原生孔隙类型主要为粒间孔(图2a);次生孔隙主要类型有粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔隙、特大孔隙和裂隙等,其中以粒间溶孔最为发育(图2b),约占总孔隙的50%~70%。在扫描电镜下孔喉连通性很好,多是由杂基(多为云灰质)、胶结物或不稳定颗粒边缘部分溶解形成。

2.3.2 孔隙度与渗透率特征

深层阜一段储层孔隙度最高值为20%,最低值为3%,孔隙度的频率最大值主要集中在8%~10%;渗透率最高值为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最低值为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率的频率最大值主要集中在 $(1 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。深层储层整体表现为低孔、低渗特征。

3 有效储层形成控制因素

3.1 沉积微相

沉积微相控制了沉积体、储层岩性类型、储层非均质性及其胶结物含量和分布^[8-9]。阜一段储层物性明显受沉积微相控制(图3)。三角洲水下部分主要沉积微相有水下分流河道、河口砂坝和前缘席状砂。在三种沉积微相中,水下分流河道沉积物粒度较粗、厚度大,其次是河口砂坝,前缘席状砂体储集物性明较前两者粒度细、厚度变薄。

从不同沉积微相与孔隙度的关系来看,同一深度下,不同沉积微相的孔隙度差异较大。整体来看,水下分流河道的孔隙度最好,其次是河口坝,再次是前缘席状砂。因此,水下分流河道和河口坝是物性条件有利的沉积微相。在埋深3 000 m左右,水下分流河道和河口坝的平均孔隙度在8%~15%,而前缘席状砂孔隙度普遍在10%以下。渗透率也表现出相同的变化

特点,如水下分流河道、河口坝平均渗透率在 $(0.8 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而前缘席状砂平均渗透率多在 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。由此可见,有利的沉积微相有效地控制了有效储层的形成与分布。

3.2 埋深与成岩作用

埋深的增加导致孔隙的压实胶结等成岩作用的加强^[10-12]。通过统计不同地区的孔隙度与埋深的关系,认为虽然不同地区的孔隙度与深度拟合关系不完全相同,但孔隙度受埋深的影响明显,表现为随着埋深增大,孔隙度逐渐减小。其中埋深在3 000 m左右,平均孔隙度仍能在8%以上,最大达12%,这一孔隙度在有效储层标准之上,具备有利的储层条件。因此,3 000 m左右深度是目前探索阜一段深层较为合适的下限深度。

高邮凹陷砂岩储层的原生孔隙受压实作用的控制非常明显。但埋深3 000 m的储层仍有8%~12%的孔隙度,主要是强烈的次生溶蚀作用导致次生孔隙发育。在此储层埋深段,储层处于晚成岩期A1期(在此阶段,伊/蒙混层含量由30%~50%下降到20%~30%)。砂岩的成岩作用有不稳定组分的溶蚀作用,抵消了压实作用引起的孔隙度减少。溶蚀作用主要是方解石胶结物的溶蚀,其次是长石颗粒和岩屑的溶蚀。此外,其它一些不稳定组分也发生一定程度的溶蚀,石英自生加大较为常见。孔隙类型主要是次生孔隙,最大可以达到15%,一般砂岩孔隙度10%左右。

3.3 异常高压与油气充注

深层系地层主要发育在凹陷的内斜坡区和深洼区,存在明显的异常高压层,超高压可形成压力封闭^[13-15]。压力封闭是指泥岩渗透率降低到不再发生正常压实和流体排泄时,在其中间段形成的具有异常流体压力、高可塑性和高毛细管压力的压力封闭层。

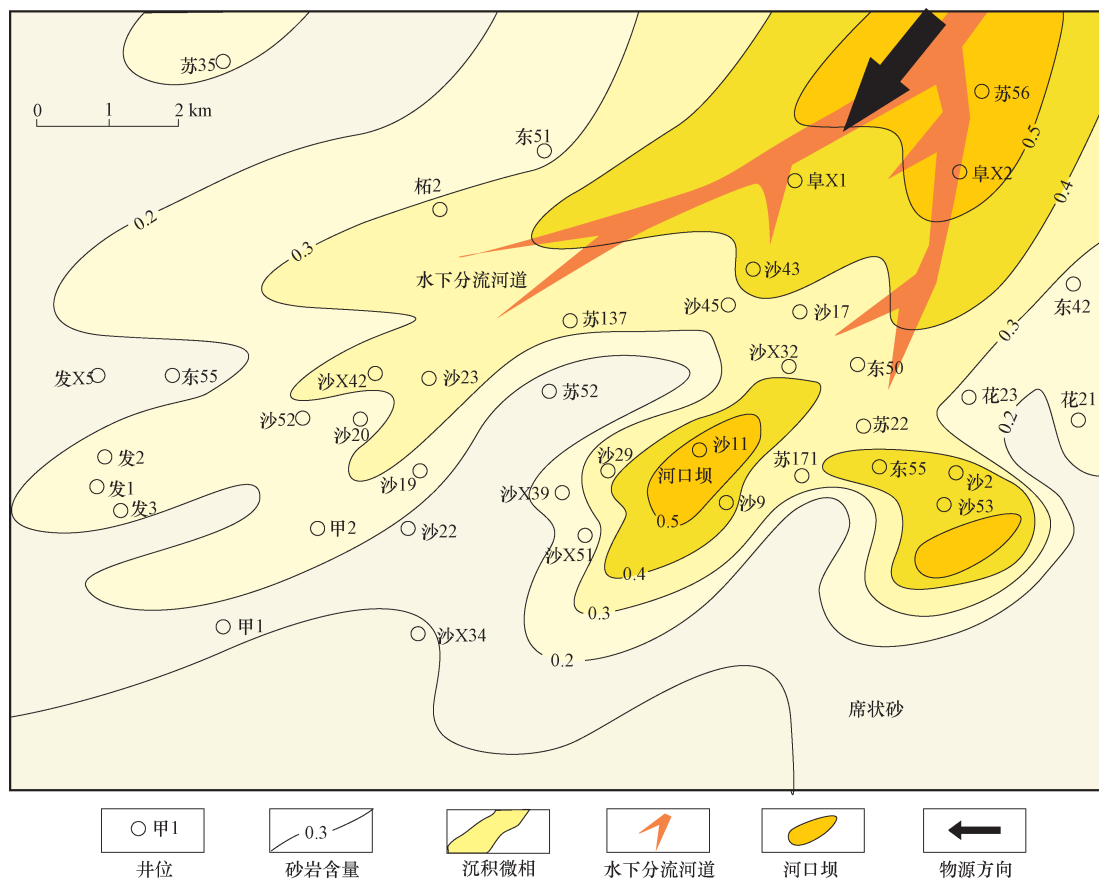


图3 北部沙埕三角洲砂体沉积微相分布

Fig. 3 Distribution of sandbodies of various microfacies in Shanian delta of the northern Gaoyou Sag

阜一段上部的阜二段地层,泥岩厚度为250~300 m,区域分布稳定,既是良好的生油层又是良好的区域盖层,且实测压力系数在1.4左右,明显大于纵向地层压力系数10%~20%,表现出超高压层特征。该异常高压层形成于中新世中期,形成时间早,欠压实形成的高压可以抑制上覆地层的压实作用,对储层原生粒间孔隙有一定的保护作用。

深层系存在异常高压层有利于油气充注,油气充注时间早于砂岩致密化(甚至包括压实)时间,有利于储集空间保存^[16-17]。研究区深层系砂岩,在浅层时孔隙度较高,中新世晚期被油气充填,之后随着埋深的增加,胶结作用受到抑制,仍有较好的孔隙度。如在埋深3 000 m左右,有油气充注砂岩的平均孔隙度均在8%以上;在同一深度下,油浸、油斑级别的砂岩孔隙度明显好于油迹以下级别的砂岩孔隙度,反映出油气充注也是提高储集空间的有利因素。有实际资料证实:如花14井在3 193.8~3 196.6 m井段,实测压力系数1.312 9,试油抽汲日产液9.8 m³,表明异常高压条件下有较好的物性,有利于形成较好的产能。

4 结论

1) 高邮凹陷发育上、中、下三套含油气系统。深

层属下含油气系统,油气地质条件表现为“上生下储”特点,即上部阜二段异常高压体之外烃源岩所生成的油气,在异常体产生的异常高压下可下排进入阜一段储层。因此,阜一段是深层主要储层。

2) 阜一段主要为三角洲前缘亚相沉积,砂体发育。但由于埋深大,整体表现为低孔低渗特征。

3) 沉积微相、埋深与成岩石作用、异常高压与油气充注控制了深层有效储层的发育。水下分流河道和河口坝是有效储层发育有利的沉积微相,3 000 m左右储层埋深段处于晚成岩A1期,次生溶蚀作用导致次生孔隙发育,改善了储集条件。深层存在的异常高压层可促使其外的油气向储层充注,适时的油气充注可使储层物性得到较好保护。其中,有利的沉积微相和发育次生孔隙带,是决定深层发育有效储层的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 王路,陆梅娟,毕天卓. 高邮凹陷阜三段砂岩储层控制因素分析[J]. 石油天然气学报,2013,35(2):45-49.
Wang Lu, Lu Meijuan, Bi Tian-zhuo. Controlling factors of sandstone reservoir in the third member of Funing Formation in Gaoyou Sag [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(2): 45-49.
- [2] 秦伟军. 泌阳凹陷大型构造-岩性复合油藏的成藏要素[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 432-436.
Qin Weijun. Reservoiring factors of large structural-lithologic compos-

- ite oil reservoir in Biyang depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 432-436.
- [3] 邱旭明. 苏北盆地高邮凹陷油气输导特征及油气分布[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 437-443.
- Qiu Xuming. Features of carrier beds and distribution of oil and gas in the Gaoyou Sag, the Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 437-443.
- [4] 秦伟军. 中国东部断陷盆地石油潜力资源量分布及转化探明储量潜力[J]. 当代石油石化, 2006, 14(8): 21-22, 25.
- Qin Weijun. Distribution of potential petroleum resources and invert potential of geologic reserves in the eastern fractured basins of China[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2006, 14(8): 21-22, 25.
- [5] 王敏, 秦伟军. 南襄盆地泌阳凹陷油气藏形成条件及聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 169-172.
- Wang Min, Qin Weijun. Pool-forming condition and accumulation regularity of oils and gases in Biyang Depression, Naxiang BASIN[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 169-172.
- [6] 秦伟军. 中国东部中小断陷盆地油气勘探成果与技术[M]. 中国石油大学出版社, 2006: 168-171.
- Qin Weijun. Exploration achievements and technology of oil and gas exploration in the middle and small fault depression basin in eastern China[M], China University of Petroleum press, 2006: 168-171.
- [7] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 257-270.
- Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 257-270.
- [8] 李小地. 中国大油气田特征与发现前景[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 127-130.
- Li Xiaodi. Distribution characteristics and discovery prospect of giant oilfields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 127-130.
- [9] 李晓光, 郭彦民, 蔡国刚, 等. 大民屯凹陷隐蔽型潜山成藏条件与勘探[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 135-141.
- Li Xiaoguang, Guo Yanmin, Cai Guogang, et al. Subtle buried hill reservoir accumulation conditions and exploration in Damintun Sag, Liaohe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 135-141.
- [10] 陈萍. 泌阳凹陷陡坡带砂砾岩体预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 198-200.
- Chen Ping. Sand reservoir prediction of steep slope zone in Biyang Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 198-200.
- [11] 郭永强, 吴元燕, 刘洛夫, 等. 油气空间分布特征研究理论与与实践[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 131-135.
- Guo Yongqiang, WU Yuanyan, Liu Luofu. Theories and application of hydrocarbon spatial distribution[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 131-135.
- [12] 张兴良, 田景春, 王峰, 等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价——以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒8段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 212-217.
- Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: a case from the 8th Member of Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao region, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 212-217.
- [13] 操应长, 王艳忠, 徐涛玉, 等. 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体有效储层的物性下限及控制因素[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 230-237.
- Cao Yingchang, WANG Yanzhong, Xu Taoyu, et al. The petrophysical parameter cutoff and controlling factors of the effective reservoir of beach and bar sandbodies of the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in west part of Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 230-237.
- [14] 胡慧婷, 王龙, 刘岩, 等. 超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力研究方法及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 359-364.
- Hu Huiting, Wang Long, Liu Yan, et al. Research method of fault vertical sealing capacity in overpressure mudstone caprock and its application[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 359-364.
- [15] 黄志龙, 朱建成, 马剑, 等. 莺歌海盆地东方区高温高压带黄流组储层特征及高孔低渗成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 288-296.
- Huang Zhilong, Zhu Jiancheng, Ma Jian, et al. Characteristics and genesis of high-porosity and low-permeability reservoirs in the Huangliu Formation of high temperature and high pressure zone in Dongfang area, Yinggehai Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 288-296.
- [16] 柳锦云. 低渗透油藏有效厚度下限标准研究[J]. 海洋石油, 2008, 9, 70-73.
- Liu Jinyun. Research on the minimum net pay thickness in low permeability reservoirs[J]. Offshore Oil, 2008, 9, 70-73.
- [17] 钟思瑛. 高邮凹陷北斜坡中东部地区阜三段储层综合评价[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 41-44.
- Zhong Siying. Journal of oil and gas technology comprehensive reservoir evaluation on E₃ in the mid-east area of northern slope of Gaoyou Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 41-44.

(编辑 张玉银)

《石油与天然气地质》2016 年报道计划

2016 年计划出版《石油与天然气地质》期刊 6 期, 主要有 3 个专题: “21 世纪大油气田发现及启示”、“陆相页岩油气勘探开发研究进展”和“深层超深层海相碳酸盐岩油气赋存机理与潜力”。

欢迎广大作者不吝赐稿。

《石油与天然气地质》编辑部