

济阳坳陷超压结构差异性及其控制因素

王永诗, 邱贻博

(中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257001)

摘要: 济阳坳陷作为我国东部渤海湾盆地内重要的富烃坳陷之一, 内部具有复杂多样的压力环境。通过对济阳坳陷内各凹陷的实测地层压力统计、泥岩超压测井响应以及超压剖面发育特征的研究, 将东营凹陷、车镇凹陷、沾化凹陷和惠民凹陷的超压系统划分为3种: 单-强超压系统、复合超压系统与单-弱超压系统。单-强超压系统分布在东营凹陷与车镇凹陷, 纵向上发育沙河街组三段-四段一个超压系统, 超压幅度大, 压力系数可达1.8以上。复合超压系统分布在沾化凹陷, 纵向上发育沙一段、沙三段和沙四段3个超压带, 且相互独立。单-弱超压系统分布在惠民凹陷, 发育沙三段一个超压系统, 超压的幅度相对较弱, 压力系数不超过1.4。超压结构的差异性与烃源岩发育层系、热演化程度、压力封闭层分布以及断裂活动密切相关。烃源岩分布与演化控制了超压的形成和分布, 压力封闭层控制着超压顶底界面, 深大断裂控制了超压系统内外横向边界。

关键词: 地层压力; 超压系统; 断陷盆地; 济阳坳陷

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Overpressure structure dissimilarity and its controlling factors in the Jiyang Depression

Wang Yongshi, Qiu Yibo

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Jiyang depression, one of the important petroliferous depressions in Bohai Bay Basin of eastern China, has the most complex and diverse pressure systems. Based on statistics of the measured pressures, log responses of mudstone overpressures and characteristics of over-pressure profiles of many sags in Jiyang depression, we divide the overpressure systems in Dongying, Chezhen, Zhanhua and Huimin sags into three types, namely the single high overpressure system, the compound overpressure system and the single low overpressure system. The single overpressure system distributes laterally in Dongying and Chezhen sags and occurs vertically as one overpressure zone in overpressure Es^3 - Es^4 , with a relatively large overpressure amplitude and a pressure coefficient over 1.8. The compound overpressure system distributes laterally in Chezhen sag and occurs vertically as three separate overpressure zones in Es^1 , Es^3 and Es^4 respectively. The single low overpressure system distributes laterally in Huimin sag and occurs vertically as only one overpressure zone in Es^3 with a comparatively small overpressure amplitude and a pressure coefficient less than 1.4. The dissimilarities of the overpressure structures in different sags are closely related to the sequences and the thermal maturities of source rocks, the distribution of pressure sealing layers, and the fault activities, in the sags. The distribution and thermal evolution of source rocks control the formation and distribution of the overpressure system. The pressure sealing layers control the top and bottom boundaries of an overpressure system. The deep-rooted faults control both the inside and outside horizontal boundaries.

Key words: formation pressure, overpressure system, rifted basin, Jiyang Depression

济阳坳陷作为我国东部渤海湾盆地内重要的富烃坳陷之一, 内部由东营凹陷、沾化凹陷、车镇凹陷和惠民凹陷4个相对独立的凹陷组成, 具有复杂多样的压力环境、油藏特征及成藏组合。自1962年东营凹陷的

营4井在沙三段首次发现超压油气藏以来, 该区超压及其对成藏的研究一直是众多学者关注和研究的热点^[1-13], 目前所取得的主要成果和认识可以归纳为以下几个方面: ①具有超压特征, 济阳坳陷内部各凹陷超

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2017-02-15。

第一作者简介: 王永诗(1964—), 男, 教授级高级工程师, 油气勘探与管理。E-mail: wangysh. slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05006)。

压现象非常普遍,超压分布的主体层位为沙四上亚段和沙三段;②泥岩欠压实和烃源岩生烃增压被认为是该地区主要的超压成因机制;③油气成藏具有“高压驱动”、“幕式排烃”和“多期成藏”的成藏特征。

尽管济阳拗陷内的东营凹陷、沾化凹陷、车镇凹陷和惠民凹陷在构造、地质要素以及压力形成和演化方面具有相似特征,但实际勘探表明,四个凹陷在压力及成藏方面存在着差异性。差异性主要是体现在压力结构、分布特征以及对油气的控制等方面^[8-10]。本文利用大量的钻井、测井、录井以及试井等资料,对济阳拗陷内各凹陷的实测地层压力特征、泥岩超压测井响应、超压带发育特征及其主控因素开展了更为深入的分析。

1 实测地层压力特征

根据东营凹陷、沾化凹陷、车镇凹陷和惠民凹陷5 000多个实测地层压力数据统计结果(图1),可知济阳拗陷超压现象非常普遍,其中东营凹陷和沾化凹陷超压幅度最大,车镇凹陷次之,惠民凹陷最弱。

从东营凹陷实测地层压力数据来看,东营凹陷沙一段和沙二段及以上地层主要发育常压,沙三段和沙四段开始出现超压,随着埋深的增大,地层压力系数明显增大,沙三段和沙四段压力系数最高可达1.99。从深度上看,2 200 m以上地层发育常压,而明显的异常压力出现在2 200 m以下地层中,到2 800 m以下地层压力又有明显增强,压力在纵向上具有明显的三层结构:上部常压带、中部过渡压力带与下部异常高压带。

车镇凹陷纵向压力分布特征与东营凹陷具有极好相似性。从层系上来看,车镇凹陷沙二段及以上的地层基本不发育超压,超压发育的层段主要是沙三段和沙四段,从深度上来看,2 200 m以上为常压区,2 200 m以下开始出现超压,其中,地层埋深在3 000 m以下时压力系数进一步增大,最高可达1.8,具有明显的强超压。

沾化凹陷压力分布与东营凹陷和车镇凹陷相比,既有相似性又有差异性。从层系上来看,沾化凹陷超压发育的层系主要是沙三段和沙四段,超压发育的强度也较大。除了沙三段和沙四段外,沾化凹陷的沙一段与孔店组也发育部分弱超压。从深度上来看,沾化凹陷超压发育的深度主要分布在2 500~4 200 m,在2 500 m以上、4 200 m以下的深度主要发育常压。

从惠民凹陷实测地层压力数据来看,惠民凹陷超压发育的层系主要是沙三段,与其他3个凹陷相比,超压发育的强度明显较弱,最大的压力系数在1.37附

近。从深度上来看,惠民凹陷超压开始出现的深度有所加深,在3 000 m以下才开始出现超压,3 000 m以上为常压区。

2 泥岩超压结构测井响应特征

在东营凹陷、沾化凹陷、车镇凹陷和惠民凹陷,单井泥岩声波时差能够很好地反映超压在纵向上的发育特征^[11-12]。在超压响应特征识别过程中,考虑到东营凹陷、车镇凹陷、沾化凹陷和惠民凹陷超压特征的相似性和差异性,分别从四个凹陷的深洼区选取了利67井、车66井、义深10井和夏942井进行泥岩超压测井响应特征分析。整体上来看,东营凹陷和车镇凹陷在垂向上压力特征非常相似,超压主要发育在沙三段和沙四段,具有单一强超压系统;沾化凹陷在垂向上压力特征相对复杂,沙一段、沙三段和沙四段超压相互独立,形成多个超压系统;惠民凹陷超压主要集中在沙三段,超压强度较弱,具有单一弱超压系统。

2.1 东营凹陷与车镇凹陷单一强超压测井响应特征

利67井位于东营凹陷利津洼陷深洼区,井深4 241 m,钻到沙四上亚段,是发育单超压带的典型井。从该井的泥岩声波时差曲线来看(图2),纵向上泥岩高声波时差出现在沙三段和沙四段,曲线十分明显地偏离正常压实趋势线,计算泥岩压力证实泥岩高时差段为强超压带。超压带顶界深度约在3 000 m,为沙三上亚段的暗色泥岩段;超压带主体即强超压范围发育在沙三中、下亚段至沙四上亚段,是主要成熟烃源岩发育带,其间没有明显的封隔层;超压底界未被该井揭示,按照压力线变化趋势超压底界应该在沙四下亚段。

车66井位于车镇凹陷套尔河洼陷深洼区,井深4 500 m,钻到沙四上亚段,为发育单超压带的典型井(图3)。该井的泥岩声波时差偏离正常压实趋势线的地层为沙三段和沙四段,计算泥岩压力和实测压力证实泥岩高时差段为超压带,超压带顶界深度约在3 500 m,为沙三中亚段的暗色泥岩段;超压带主体即强超压范围发育在沙三下亚段,是主要成熟烃源岩发育带,其间没有明显的封隔层;超压底界该井未揭示,压力线变化趋势显示沙四上亚段也应该发育超压。

2.2 沾化凹陷复合超压测井响应特征

义深10井位于沾化凹陷渤南洼陷义东断裂带下降盘,井深4 200 m,钻到沙四下亚段,为发育三超压带的典型井(图4)。泥岩异常高声波时差范围主要发育

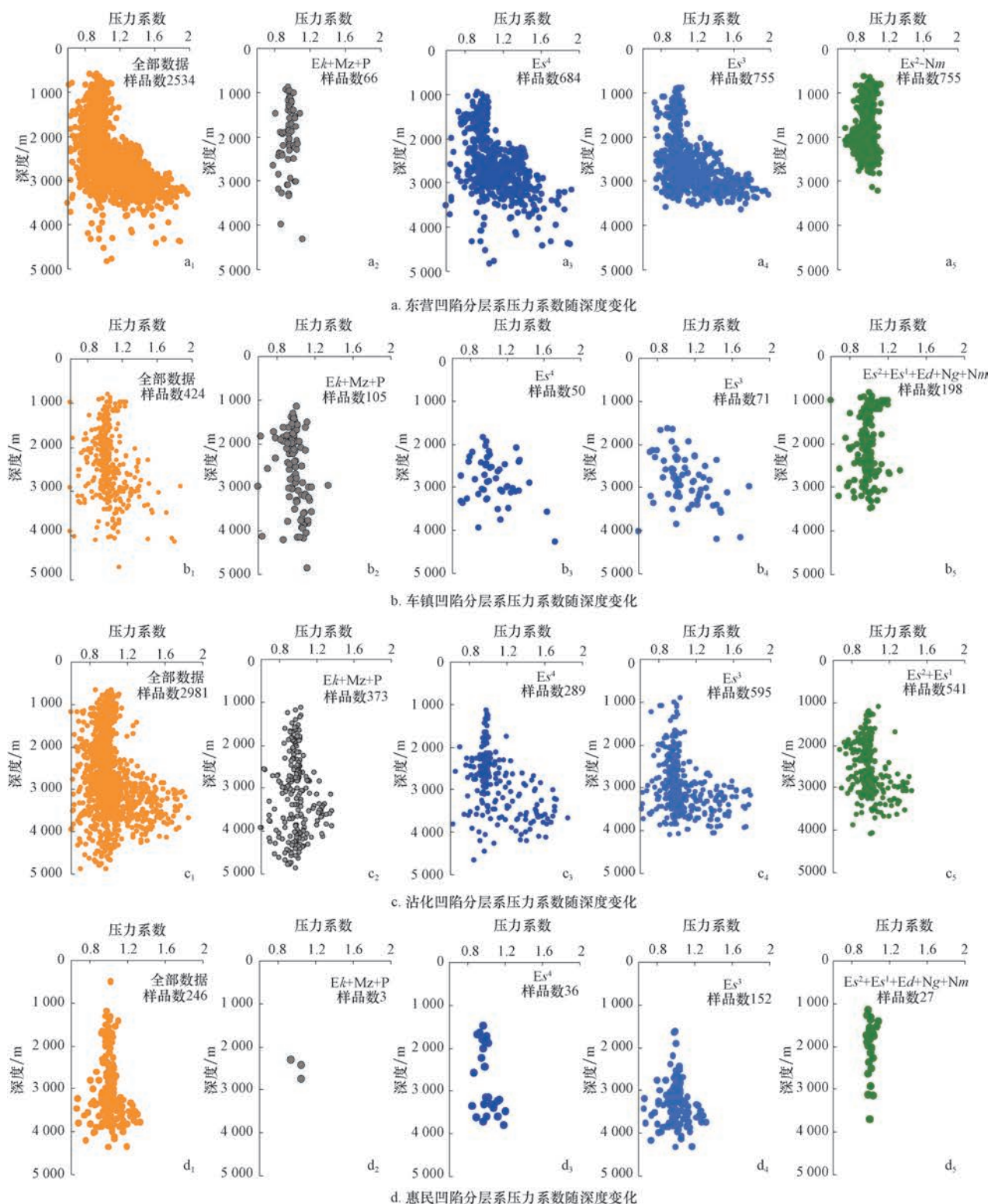


图1 济阳凹陷实测地层压力与埋深关系

Fig. 1 Relationship between measured pressure and burial depth in the Jiyang depression

在沙一段、沙三段和沙四下亚段;而沙二段的砂岩以及沙三下亚段底部至沙四上亚段约 250 m 厚的膏泥岩层段的泥岩声波时差接近正常压实趋势线,由于该带的分隔,该井纵向上发育三个相互独立的超压带,即出现上、中、下三个超压带。上超压带发育在沙一段,超压

顶界面深度为 2 900 m,厚度约 150 m,超压幅度相对较弱;中超压带发育在沙三段,超压顶界面深度为 3 200 m,厚度约 750 m,并在沙三下亚段底部超压幅度明显减小;下超压带发育在沙四上亚段下部至沙四下亚段上部,超压幅度在钻井揭示的范围可见显著增加

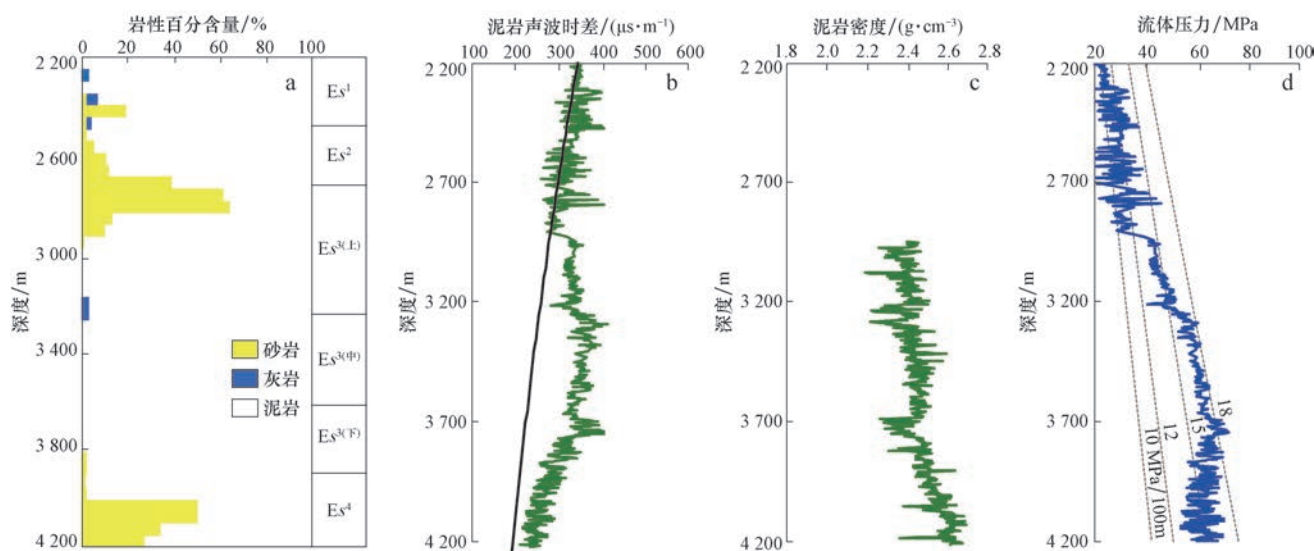


图2 东营凹陷利67井压力测井响应曲线

Fig. 2 Pressure log response curves of Well Li 67 in the Dongying Sag

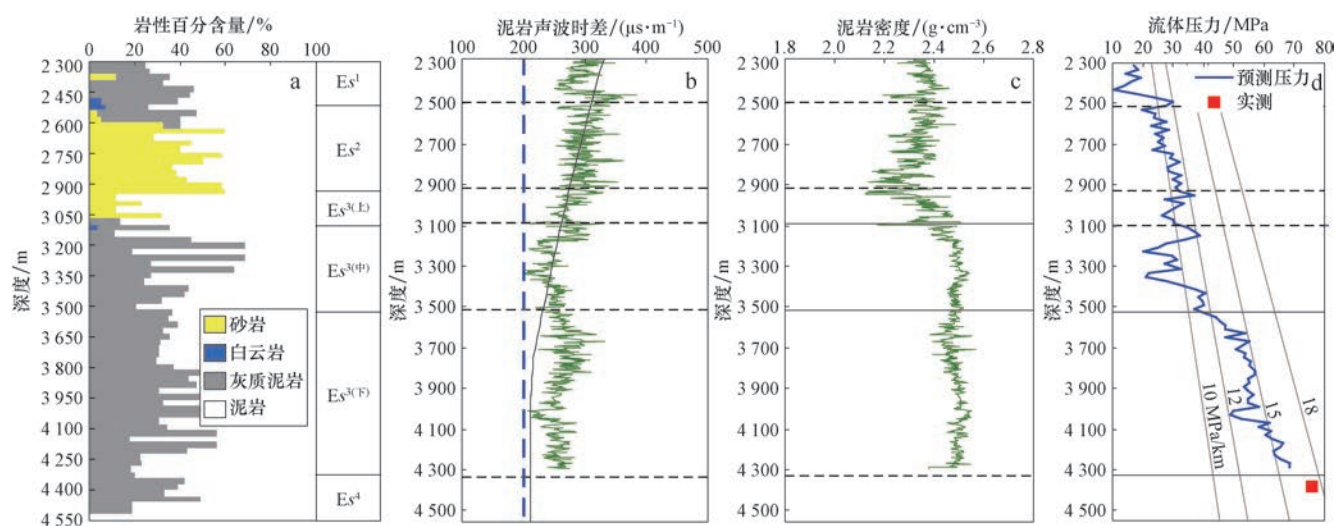


图3 车镇凹陷车66井压力测井响应曲线

Fig. 3 Pressure log response curves of Well Che 66 in the Chezhen Sag

的趋势,推测下超压带向深部延伸的范围可能较大。

2.3 惠民凹陷单—弱超压测井响应特征

夏942井位于惠民凹陷临南洼陷深洼区,为发育单弱超压带的典型井(图5)。上段泥岩声波时差曲线随深度增加而减小,该井泥岩声波时差偏离正常压实趋势线的地层出现在沙三段,计算泥岩压力和实测砂岩压力证实泥岩高时差段为弱超压带。超压带顶界深度约在3400 m,为沙三中亚段的顶部;超压带主体即弱超压范围主要发育在沙三中、下亚段,其间没有明显的封隔层;超压带的底界为沙三下亚段的下部,其下部砂质含量较大,储层连通性好,泥岩声波时差和密度均表现为正常值,地层为常压。

3 超压结构剖面发育特征

单井解剖能够了解井孔的压力结构,而剖面分析则可以了解横向压力结构的变化。本次主要选择了横切过东营凹陷和沾化凹陷主要构造单元的的东西向剖面(剖面位置见图6),来反映单超压和多超压系统在剖面上的发育特征。根据三维地震资料建立地层构造格架,利用单井声波时差资料计算地层压力和压力系数后,对比相邻井压力曲线,综合试油测压数据和油气层综合解释结果,作出了剖面地层压力等值线图。

滨436—盐16剖面是一条横穿东营凹陷北东—

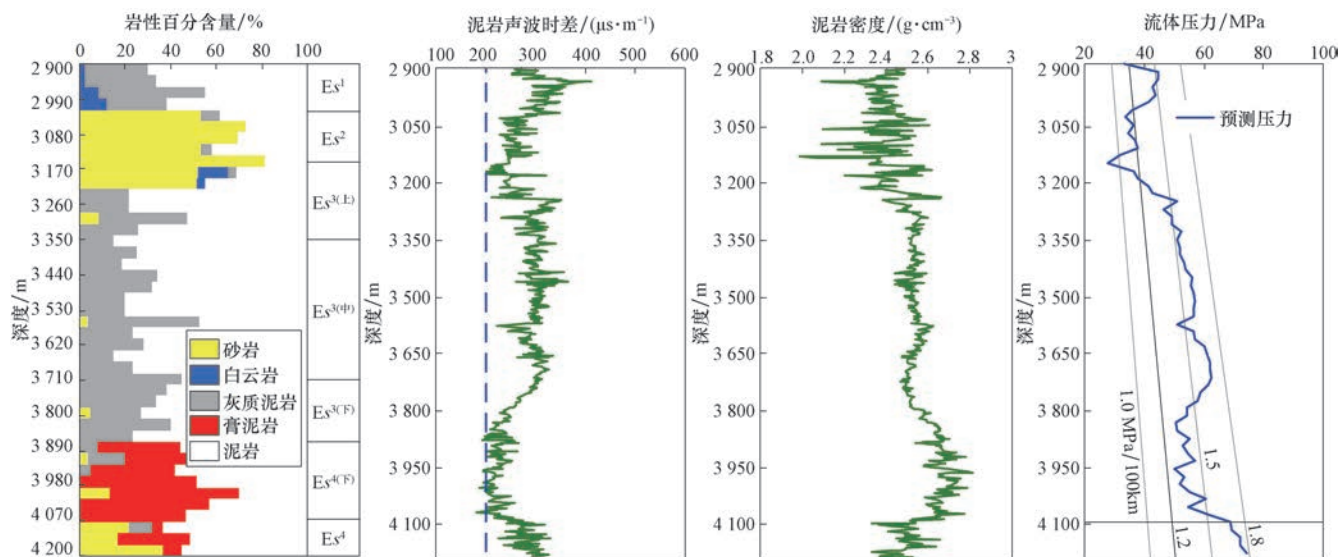


图4 沾化凹陷义深10井压力测井响应曲线

Fig. 4 Pressure log response curve of Well Yishen 10 in the Zhanhua Sag

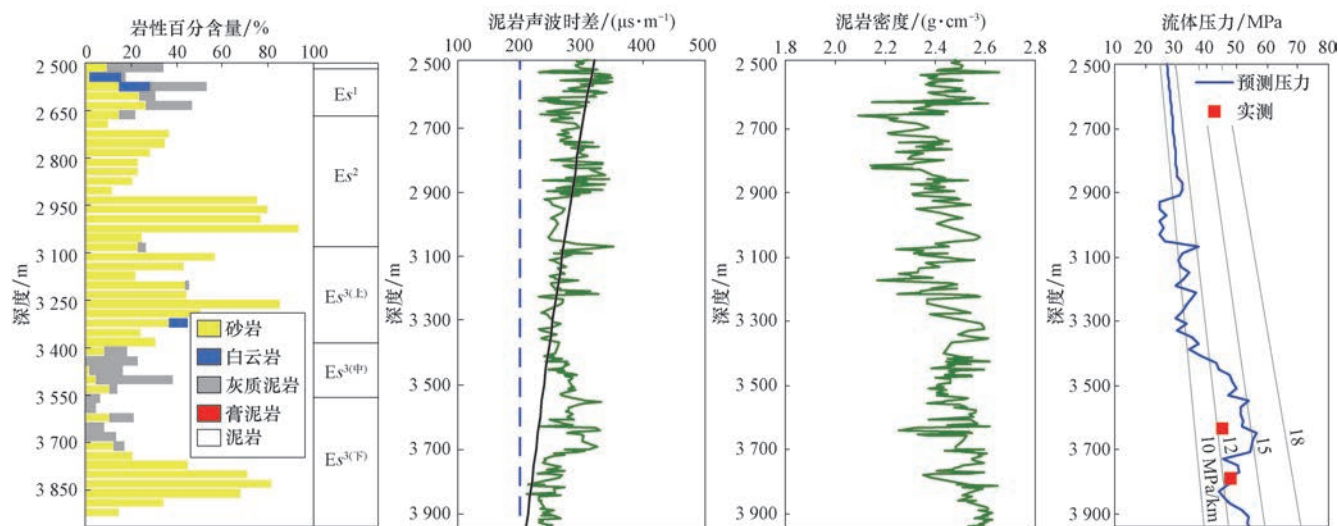


图5 惠民凹陷夏942井压力测井响应曲线

Fig. 5 Pressure log response curve of well Xia 942 in the Huimin Sag

南西走向的大剖面(图7),全长约55 km,自西向东依次过平方王凸起、利津洼陷、董集洼陷、民丰洼陷和陈家庄凸起。从地层压力系数等值线图可以看出,东营凹陷主要发育沙三段-沙四段一个超压系统。横向上来看,超压系统发育规模大、分布范围广、超压幅度强,超压带主体位于盆地的深洼区,各深洼区具有统一的超压系统,向盆地边缘地层压力逐渐过渡为常压区。纵向上来看,超压主要发育在沙三中亚段-沙四上亚段,为典型的单超压系统,分布范围受生烃系和深度控制,向上从沙二段开始地层压力逐渐过渡为常压,向下从沙四下压段逐渐过渡为常压。

义深3—义160剖面是一条横穿沾化凹陷东西向

的大剖面(图8),全长约30 km,自西向东依次过义和庄凸起、四扣洼陷、渤南洼陷和孤岛凸起。从地层压力系数等值线图可以看出,沾化凹陷自上而下可以分为上、中、下3个超压系统。上超压系统由沙一段超压带组成,沙一段的超压带分布范围较小,只在盆地中心有局部分布,超压幅度低,最大压力系数不超过1.3。中超压系统主要由沙三段超压带组成,沙三段超压带规模大、分布范围广,超压幅度高。下超压系统主要分布在沙四段,分布范围受到沙四段顶部膏岩封闭层的控制,根据泥岩声波时差和少量的实测压力数据显示,推测在沙四下亚段下部地层压力逐渐过渡为常压。

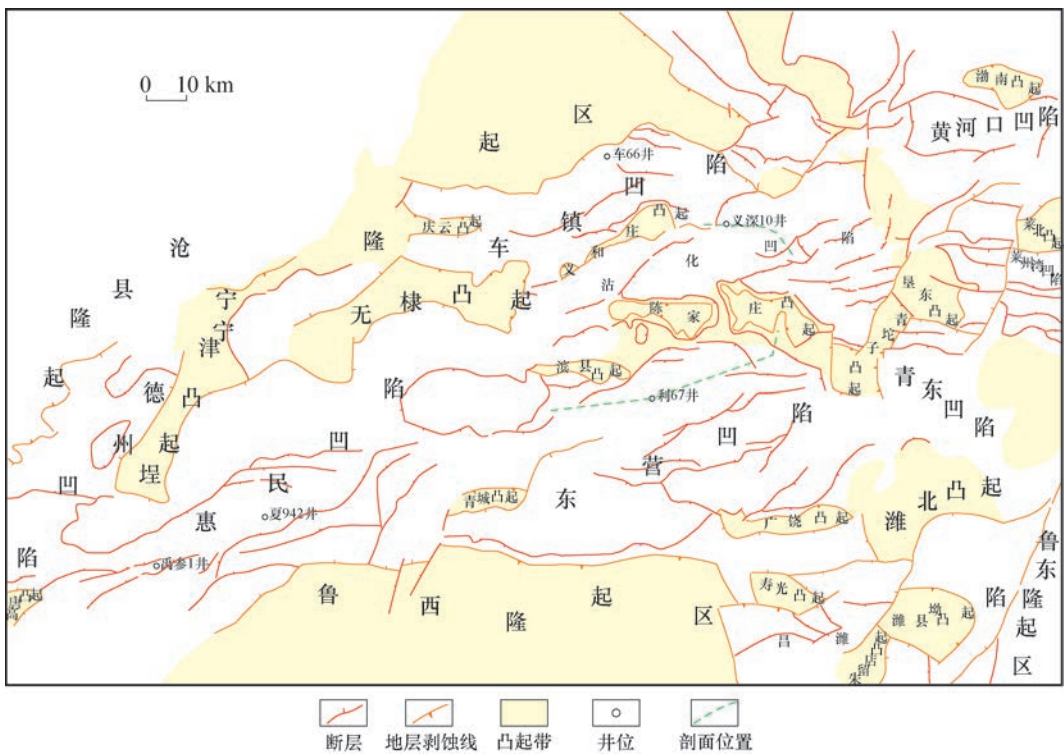


图 6 济阳拗陷构造单元分区及压力剖面位置

Fig. 6 Tectonic unit subdivision and pressure profile position in the Jiyang Depression

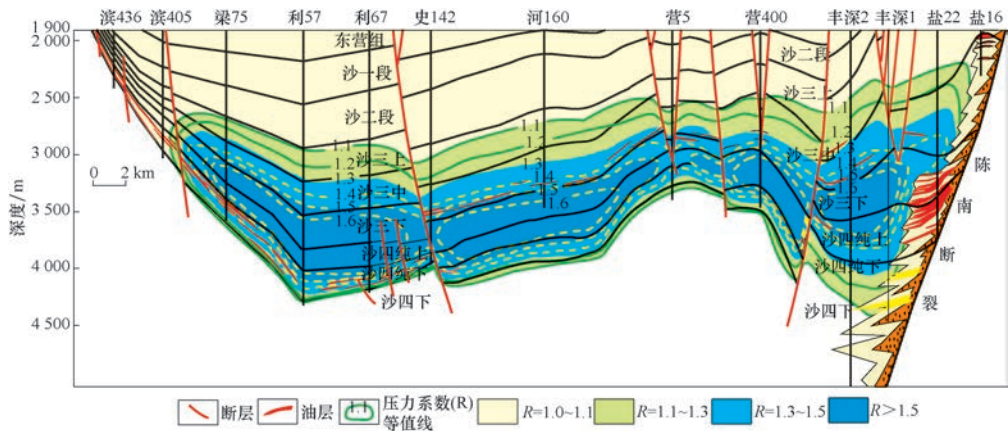


图 7 东营凹陷北东 - 南西向地层压力剖面

Fig. 7 Pressure profile from northeast to southwest of the Dongying Sag

4 超压结构控制因素

超压的存在是多种因素控制的结果,其中烃源岩发育层系、范围、埋深、厚度及热演化是现今超压形成的主要因素^[13],同时压力封闭层与断裂活动等又对超压空间分布和内部结构调整产生重要的影响。

4.1 烃源岩分布、热演化程度控制了超压的形成和分布

东营凹陷、车镇凹陷、沾化凹陷和惠民凹陷超压发育的层系主要在沙四段、沙三段以及部分沙一段,分布

在深洼陷 2 200 ~ 4 200 m 范围内,超压带主体处于成熟烃源岩发育带^[13-15]。超压发育的幅度与烃源岩厚度和有机质热演化程度具有较大的关联性。东营凹陷深洼区沙三段 - 沙四段烃源岩厚度可达 1 000 m,实测最大压力系数可以达到 2.0。沾化凹陷深洼区沙三段 - 沙四段烃源岩厚度在 600 ~ 800 m,实测最大压力系数在 1.8 左右。惠民凹陷深洼区烃源岩厚度相对较薄,夏 942 井揭示的泥岩厚度只有 300 m,实测最大压力系数不超过 1.4。同时随着烃源岩埋深的增大,热演化程度越高,大量生排烃所形成的超压幅度就越大,这一现象在东营凹陷和沾化凹陷表现非常明显。东营

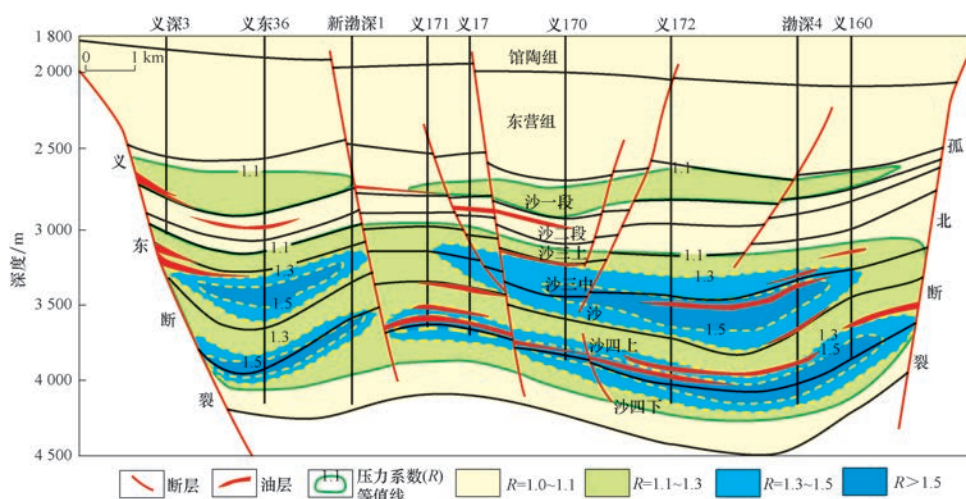


图8 沾化凹陷东西向地层压力剖面

Fig. 8 Pressure profile from west to east of the Zhanhua Sag

凹陷压力系数在大于1.6的范围,主要分布在利津洼陷、民丰洼陷以及牛庄洼陷深洼区, R_o (镜质体反射率)大于0.8%,压力系数小于1.4的范围主要位于盆地的斜坡区和盆缘, R_o 小于0.6%。沾化凹陷沙一段压力系数基本上都小于1.3, R_o 最大值为0.5%;沙三段超压非常明显,压力系数可达1.8,相应烃源岩 R_o 分布范围也较广,最大值达到1.0%左右^[15]。

4.2 压力封闭层控制着超压顶、底界面

超压体的存在是有条件的,压力封闭层和输导层的存在对超压体的保存和逸散起到了控制作用^[16]。压力的封闭层往往与一些特殊的岩性有关,例如东营凹陷沙三段和沙四段超压顶界面主要位于沙三上亚段,这与沙三上亚段时期沉积的大套块状层理为主的深灰色泥岩、泥质灰岩和砂泥岩互层有关。而沙三段与沙四段超压系统的底界面可能与沙四下亚段发育的多套膏盐层有关。沾化凹陷纵向上主要发育三套超压系统,其中沙一段底部的白云岩和沙四上亚段顶部的膏盐层分割了这3套超压系统,尤其是渤南洼陷沙四上亚段顶部的膏盐与膏泥岩发育较广,是一套比较稳定的区域分隔层,分隔层在保存油气的同时,也对中、下超压系统起到了封闭作用。

4.3 深大断裂控制了超压系统内、外横向边界

断裂对超压的保存和分布有着重要的影响,断层既可作为压力释放的一种通道,又可作为高压流体的封闭体^[16-20]。东营凹陷与沾化凹陷发育的边界断裂和洼陷内部众多的断层对超压系统的影响主要表现在两个方面:一是连通深层超压封存箱与浅层常压区,作为超压垂向泄压和流体大规模运移的通道,断裂活动

使得断裂带附近超压发生骤然的变化,流体发生幕式运移,同时也控制了浅层的油气聚集;另一方面,尤其是控制沉积的长期、继承性大断层控制了超压体系的边界,断裂带内部的断层岩与泥岩涂抹等作用,都可形成超压封存箱的侧向封闭,遮挡油气^[17-18]。例如东营凹陷北部陡坡带的陈南断裂、沾化凹陷西部的义东断裂以及东部的孤北断裂都控制了超压系统的边界(图7,图8),断层的下降盘发育超压,上升盘为常压。

5 结论

1) 济阳拗陷超压现象非常普遍,根据实测地层压力统计、泥岩超压测井响应以及超压剖面发育特征,可将东营凹陷、车镇凹陷、沾化凹陷和惠民凹陷的超压系统划分为3种:单-强超压系统、复合超压系统和单-弱超压系统。其中单-强超压系统主要分布在东营凹陷和车镇凹陷,纵向上发育沙三段-沙四段一个超压系统;复合超压系统分布在沾化凹陷,纵向上发育沙一段、沙三段和沙四段三个超压带;单-弱超压系统分布在惠民凹陷,发育沙三段一个弱超压系统。

2) 超压的存在是多种因素共同控制的结果,其中烃源岩发育层系、范围、埋深、厚度及热演化程度基本控制了超压体的范围和大小,而压力封闭层与断裂活动又对超压空间分布和内部结构进行调整。由于各凹陷控制超压的因素存在着或多或少的差异,从而导致各个凹陷超压的结构也存在明显的不同。

参考文献

- [1] 郑和荣,黄永玲,冯有良. 东营凹陷下第三系地层异常高压体系及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发,2000,27(4):67-70.
Zheng Herong, Hong Yongling, Feng Youliang. Anomalous overpres-

- sure system of early Tertiary in Dongying depression and its petroleum geology significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(4): 67–70.
- [2] 邱桂强, 凌云, 樊洪海. 东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布规律[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 71–75.
Qiu Guiqiang, Ling Yun, Fan Honghai. The characteristics and distribution of abnormal pressure in the Paleogene source rocks of Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 71–75.
- [3] 刘峰晓, 解习农. 东营凹陷流体压力系统研究[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2003, 28(1): 78–86.
Liu Xiaofeng, Xie Xinong. Study on fluid pressure system in Dongying Depression [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(1): 78–86.
- [4] 张守春, 张林晔, 查明, 等. 东营凹陷压力系统发育对油气成藏的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 289–296.
Zhang Shouchun, Zhang Linye, Zha Ming, et al. Control of pressure system development on reservoir formation in the Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 289–296.
- [5] 蒋有录, 谭丽娟, 荣启宏, 等. 东营凹陷博兴地区油气成藏动力学与成藏模式[J]. *地质科学*, 2003, 38(3): 413–424.
Jiang Youlu, Tan Lijuan, Rong Qihong, et al. Dynamics and Modes of Hydrocarbon accumulations in Boxing area of the Dongying depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(3): 413–424.
- [6] 隋风贵. 东营凹陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(3): 17–21.
Sui Fenggui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying Fault Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 2004, 28(3): 17–21.
- [7] 张善文, 张林晔, 张守春, 等. 东营凹陷古近系异常高压的形成与岩性油藏的含油性研究[J]. *科学通报*, 2009, 54(11): 1570–1578.
Zhang Shanwen, Zhang Linye, Zhang Shouchun, et al. Formation of abnormal high pressure and its application in the study of oil-bearing property of lithologic hydrocarbon reservoirs in the Dongying Sag [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(11): 1570–1578.
- [8] 许晓明, 刘震, 谢启超, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷异常高压特征分析[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(4): 345–349.
Xu Xiaoming, Liu zhen, Xie Qichao, et al. Overpressure characteristics of the Jiyang depression in the Bohaiwan basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(4): 345–349.
- [9] 包友书, 张林晔, 李钲源, 等. 济阳坳陷古近系超高压成因探讨[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(1): 17–21.
Bao Youshu, Zhang Linye, Li Juyuan, et al. Approach to Paleogene overpressure origin in Jiyang Depression [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(1): 17–21.
- [10] 肖焕钦, 刘震, 赵阳, 等. 济阳坳陷地温—地压场特征及其石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 68–70.
Xiao Huanqin, Liu Zhen, Zhao Yang, et al. Characteristics of geotemperature and geopressure fields in the Jiyang Depression and their significance of petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 68–70.
- [11] 杨姣, 何生, 王冰洁. 东营凹陷牛庄洼陷超压特征及预测模型[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(4): 34–40.
Yang Jiao, He Sheng, Wang Bingjie. Characteristics and prediction model of the overpressures in the Niuzhuang Sag of Dongying Depression [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(4): 34–40.
- [12] 王冰洁, 何生, 宋国奇, 等. 东营凹陷不同超压成因的有效应力特征[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(2): 72–79.
Wang Bingjie, He Sheng, Song Guoqi, et al. Effective stress characteristics of different overpressured origins in Dongying Depression of the Bohai Bay Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(2): 72–79.
- [13] 何生, 宋国奇, 王永诗, 等. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1029–1041.
He Sheng, Song Guoqi, Wang Yongshi, et al. Distribution and major control factors of the present-day large-scale overpressured system in Dongying Depression [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2012, 37(5): 1029–1041.
- [14] 王乐闻, 刘四兵, 王鹏, 等. 沾化凹陷烃源岩地球化学特征分析[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2011, 13(6): 26–29.
Wang Lewen, Liu Sibing, Wang Peng, et al. The geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in Zhanhua Depression [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2011, 13(6): 26–29.
- [15] 杨晓敏. 沾化凹陷古近系地层压力分布特征及其控制因素[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(4): 25–31.
Yang Xiaomin. Distribution characteristics and its controlling factors of Paleogene formation pressure in Zhanhua sag, Jiyang depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(4): 25–31.
- [16] 陈中红, 查明. 东营凹陷流体超压封存箱与油气运聚[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 607–614.
Chen Zhonghong, Zha Ming. Overpressured fluid compartment and hydrocarbon migration and accumulation in Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 607–614.
- [17] 付晓飞, 许鹏, 魏长柱, 等. 张性断裂带内部结构特征及油气运移和保存研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 200–212.
Fu Xiaofei, Xu Peng, Wei Changzhu, et al. Internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration and conservation. *Earth Science Frontiers* [J], 2012, 19(6): 200–212.
- [18] 高君, 吕严防, 田庆丰. 断裂带内部结构与油气运移及封闭[J]. *大庆石油学院学报*, 2007, 31(2): 4–7.
Gao Jun, Liu Yanfang, Tian Qingfeng. Analysis of hydrocarbon migration through the fault based on the interior structure of fault zone [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2007, 31(2): 4–7.
- [19] 林玉祥, 赵承锦, 舒永, 等. 东营凹陷沉积—沉降中心迁移特征与机制研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(6): 19.
Lin Yuxiang, Zhao Chengjin, Shu Yong, et al. Migration Characteristics and Geodynamic Mechanism of Depocenter and Subsiding Center of Dongying Sag [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, 35(6): 19.
- [20] 刘华. 东营凹陷古近系—新近系流体—岩石相互作用分带特征[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 41–50.
Liu Hua. Fluid-rock interaction zones and their characteristics of palaeogene and neogene systems in dongying depression [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2015, 34(2): 41–50.