

文章编号:1673-5005(2012)03-0020-06

东营凹陷古近系超压顶界面分布特征及其影响因素

查明¹, 汪旭东², 曲江秀¹, 陈中红¹, 刘宏杰¹, 邓婷婷¹

(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)有限公司深圳分公司研究院, 广东 广州 510240)

摘要:对比分析利用实测压力和超压层段的测井响应特征两种方法研究超压顶界面的优缺点,认为后者具有更加坚实的理论基础,并采用该方法对东营凹陷古近系超压顶界面的分布特征及其影响因素进行研究。结果表明:古近系超压顶界面主要分布于沙三中亚段的厚层泥岩中,反映在地震层序上为 T_4 与 T_6 反射界面之间,表现出一定的“层控性”特征,其埋藏深度主要为2.4~2.8 km,在平面上表现为凹陷中心深而边缘浅的特征;超压顶界面之下的岩性为一套以深灰色泥岩、灰质泥岩及砂质泥岩为主的泥质岩组合,泥质岩的岩性构成及沉积速率在一定程度上控制了超压顶界面的层位分布,而抬升剥蚀、断裂活动及盐底辟作用是造成部分地区超压顶界面变浅的主要因素。

关键词:超压顶界面;分布特征;影响因素;古近系;东营凹陷

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.004

Distribution of top of Paleogene overpressure system and its influencing factors in Dongying depression, Jiyang Basin, East China

ZHA Ming¹, WANG Xu-dong², QU Jiang-xiu¹, CHEN Zhong-hong¹, LIU Hong-jie¹, DENG Ting-ting¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute, Shenzhen Branch of CNOOC Limited, Guangzhou 510240, China)

Abstract: Pressure measurement and logging response analysis are two common methods used to study the top of overpressure (TOO) in petroleum industry. Due to the more reliable theory basis, the latter was used to analyze the distribution and influencing factors of the Paleogene TOO in Dongying depression, Jiyang Basin. The results show that the Paleogene TOO is mainly restricted within the thick mudstones in the middle part of the third member of Shahejie formation and corresponds to the interval between T_4 and T_6 reflecting interfaces in seismic sequences, which suggests the feature of strata-controlled. The burial depth of this TOO ranges from 2.4 km to 2.8 km and shallows from the central to the margin. Sedimentary rocks below the TOO are composed of dark grey mudstone, calcareous mudstone and sandy mudstone. The horizontal distribution of TOO is partly controlled by lithology and deposition rate of underlying argillaceous rock, while tectonic uplift and denudation, faulting movement as well as salt diapirism are the primary causes of the shallowing of the TOO in certain areas.

Key words: top of overpressure; distribution characteristics; influencing factors; Paleogene; Dongying depression

超压是地下流体的非平衡状态,其形成和保存均离不开三维空间压力封闭层的作用^[1,2]。超压顶界面的形态是划分超压系统类型并进而研究超压系统内流体流动及油气运移机制的重要依据之一^[3]。当地层压力接近或达到封闭层的破裂极限时封闭层会发生水力破裂,超压系统中的油、气、水将以混相

涌流的方式发生垂向释放和穿层运移,并在浅部静水压力系统特别是超压顶界面附近聚集成藏^[2-5],深入研究超压顶界面的分布特征对深化超压分布的研究和指导超压盆地的油气勘探均具有重要意义。目前,对东营凹陷古近系超压的研究主要集中在超压的分布、成因及形成条件,超压层的地质、地球物理

收稿日期:2011-10-18

基金项目:国家油气重大专项课题(2008ZX05001);国家自然科学基金项目(40802026)

作者简介:查明(1958-),男(汉族),安徽怀宁人,教授,博士,博士生导师,主要从事油气地质与勘探方向的教学及研究工作。

及地球化学特征,超压与油气分布和油气成藏的关系等方面,也有一些学者对超压顶界面的分布及其影响因素开展过不同程度的研究^[6-10]。综合前人的研究成果发现,目前对于东营凹陷超压顶界面的分布及其影响因素的研究依然缺乏系统和全面性。因此,笔者依据超压层段的测井响应特征,综合利用泥岩声波时差及电阻率等测井资料和实测地层压力资料,对东营凹陷古近系超压顶界面的分布特征进行系统研究,并结合研究区的沉积、构造背景,分析影响超压顶界面现今分布的地质因素。

1 区域地质概况

东营凹陷属于渤海湾中、新生代裂谷盆地的三级负向构造单元,位于济阳拗陷东南部,是在古生界基岩背景上经构造运动发育起来的断陷-拗陷湖盆,总面积5 850 km²。凹陷内断层十分发育,重要的正向二级构造带主要有陡坡断裂构造带,缓坡断裂构造带,陡坡、缓坡超覆带,断裂背斜构造带,断裂鼻状构造带和潜山披覆构造带。这些正向构造带将凹陷分割成利津、牛庄、民丰和博兴4个次级洼陷。实测压力揭示东营凹陷除在盆地的边缘及基底不整合面附近普遍发育正常压力外,凹陷的中心地区均有超压发育(图1)。强超压(压力系数大于1.5)主要分布在利津、牛庄洼陷和中央隆起带,而民丰和博兴洼陷的强超压不甚发育。

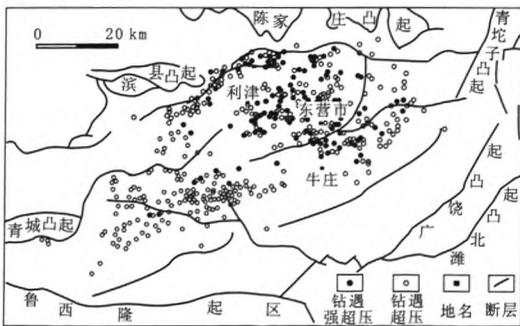


图1 东营凹陷区域构造及钻遇古近系超压的探井分布

Fig.1 Structural characteristics of Dongying depression and distribution of exploration well drilling to overpressure of Paleogene

2 研究方法

Hunt^[2]指出超压封存箱的顶板近乎水平,且具有穿层、穿时的特点。受这篇文章的影响,国内的一些研究者在确定某一地区超压顶界面的埋藏深度

时,通常是依据该地区多口钻井的实测压力数据与深度的交会图,把超压开始大量发育的深度当成超压顶界面的埋藏深度,并且认为这一深度对整个研究区是普遍适用的。笔者认为超压开始大量发育的深度不等同于超压顶界面的埋藏深度。一方面,实测压力只在目的层段进行,数据点少,不足以反映垂向上单井压力系统结构;另一方面,在超压盆地中,由于超压传递而形成的传递超压十分常见^[11],而这种类型的超压分布在常压系统中。同时,尽管存在超压开始大量发育的深度,但并没有其他证据能够证明该深度在盆地的不同构造区固定不变。

由于超压层段相比同深度的常压层段在测井响应上具有高声波时差、低电阻率特征,因此可用这两个参数识别超压顶界面。对于这些特殊的测井响应特征的形成机制不同学者持不同的观点。最早的欠压实观点认为超压层段相比于同深度的常压层段具有较高的孔隙度与地层水含量、较低的岩石密度是形成超压层段特殊测井响应的机制^[12]。但是,越来越多的学者发现深部超压带中泥岩的孔隙度和密度并未发生异常变化(即正常压实),却同样存在异常高的声波时差和低的电阻率特征^[13-15], Hermanrud等^[13]认为超压泥岩的异常声波时差和视电阻率可能反映了超压引起泥岩本身结构的变化,并可能是流体超压的直接响应,而不是高孔隙度的响应。何生等^[15]通过物理模拟实验说明,岩石中的高孔隙流体压力可导致岩石骨架颗粒间有效应力减小,从而直接引起通过岩石的声波速度减小,而这个过程与孔隙度无关;此外,在超压地层所处的温度条件下,高压液态水的电离常数可能明显增加,地层水的导电能力增强,电阻率降低。

对比分析以上两种方法研究超压顶界面的优缺点,笔者认为利用超压层段的测井响应特征识别超压顶界面具有更加坚实的理论依据。分析东营凹陷声波时差值和视电阻率值对超压单井的测井响应,发现视电阻率测井在古近系的特殊岩性段如油泥(页)岩具有不唯一性,声波测井对于超压的响应相对更稳定,基本在发育超压的部位声波时差都会偏离正常趋势^[16]。考虑到本文不需要明确单井的超压强度,而只需要确定超压段与常压段的分界线,因此直接把声波时差数据偏离正常压实趋势线的起始深度作为超压的顶界面。研究中共选取了分布在凹陷内不同构造区且发育超压(实测压力揭示)的390口钻井作为研究对象,根据其泥岩的测井响应特征确定超压顶界面的埋藏深度,并以此为基础讨论超

压顶界面的深度及层位分布特征。

3 超压顶界面分布特征

3.1 深度分布特征

对东营凹陷超压顶界面埋深数据的统计发现(图2),其分布区间为2.0~3.4 km,但不同深度区间内的样本数量差异较大,埋深为2.2~3.0 km内的样本数最多(占89.4%),而在其中埋深为2.4~2.8 km内的样本数占总样本数的56.9%,是东营凹陷超压顶界面的最主要深度分布区间。

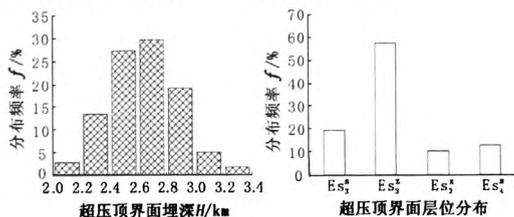


图2 东营凹陷超压顶界面埋藏深度分布层位频率图

Fig. 2 Histogram showing distribution of buried depth and measures of top overpressured surface in Dongying depression

从东营凹陷超压顶界面埋藏深度平面分布图(图3)中可以看出,凹陷内不同构造区超压顶界面的埋藏深度存在较大差异。凹陷中心特别是次级洼陷的中心超压顶界面埋深较大,深度一般大于2.8 km,而在凹陷的边缘超压顶界面埋藏较浅,深度一般小于2.6 km。位于凹陷中心的隆起区超压顶界面的埋藏深度通常小于其周围地区,如东营中央背斜带处(营字号井)的超压顶界面埋藏深度一般小于2.6 km,营1井甚至小于2.4 km,辛154井区超压顶界面埋藏深度也小于2.6 km。



图3 东营凹陷超压顶界面埋藏深度平面分布

Fig. 3 Contour map of buried depth of top overpressured surface in Dongying depression

3.2 层位分布特征

东营凹陷古近系超压顶界面的埋藏深度在不同构造区存在较大差异,但在层位分布上却有一定的规律性(图2)。超压顶界面只分布在沙三段及沙四上亚段,其中沙三上及沙三中亚段是东营凹陷超压顶界面的主要分布层系(占77%)。在凹陷中心,超压顶界面主要分布在沙三上及沙三中亚段,越往凹陷边缘超压顶界面分布的层位逐渐过渡到沙三下和沙四上亚段。

超过半数以上的超压钻井(占57.6%)的超压顶界面位于沙三中亚段,说明该段地层是东营凹陷超压顶界面的最主要分布层系。反映在地震层序上,超压顶界面通常顺着位于T₄与T₆反射界面之间的构造层分布(图4)。由此可见,东营凹陷古近系超压顶界面的分布不具有“等深性”,但具有一定的“层控性”特征。

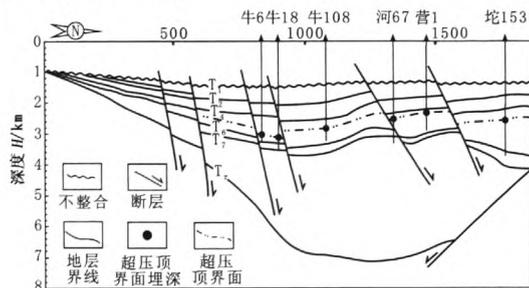


图4 东营凹陷L3371测线超压顶界面解释剖面

Fig. 4 Distribution of top overpressured surface in seismic profile of line L3371 in Dongying depression

4 超压顶界面分布的影响因素

4.1 岩性

古近系沙三、沙四段的泥岩既是超压的流体源又是超压的顶部封闭层,岩性构成对超压的形成至关重要。确定超压封闭层的最好方法是直接测压,但直接测压只在目的层段进行,单井的数据点较少,不能获得连续的压力剖面。因此,人们常将钻井液换算压力作为实测压力的补充来获得较连续的压力剖面。笔者在东营凹陷选取了钻井液换算压力与实测压力吻合较好的14口钻井井作为研究对象,分别描述其封闭层的分布、岩性构成及物性参数(表1),其中的压力系数是指超压封闭层之下的超压段中的最大压力系数,亦即该封闭层能封闭的最大压力。从表1中可以看出,东营凹陷超压封闭层主要位于沙三段,岩性主要为深灰色泥岩、灰质泥岩及砂质泥岩的组合,其中主要为深灰色泥岩,灰质泥岩与砂质泥

岩的相对含量视构造位置的不同而不同。此外,这种特殊的岩性构成中通常也含有一定数量的粉砂岩和泥质粉砂岩,但砂岩的单层厚度薄、纵向上出现的频率低。

表 1 东营凹陷不同钻井超压封闭层特征

Table 1 Characteristic of overpressure seal F_p of different wells in Dongying depression

井号	超压顶界面深度 H/km	厚度 δ/m	砂泥比/%	压力系数 F_p	分布层位	岩性构成
滨 661	2.28	390	2.6	1.29	E_{s3}	砂质泥岩、粉砂质泥岩、碳质泥岩
滨 663	2.03	690	7.6	1.20	$E_{s2}-E_{s3}$	深灰色泥岩、灰质泥岩、砂质泥岩
河 180	2.64	560	7.9	1.52	E_{s3}^*	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
利 912	2.25	1100	4.7	1.35	$E_{s3}^*-E_{s4}^*$	深灰色泥岩、灰质泥岩、砂质泥岩
牛 876	2.75	870	12.3	1.76	E_{s3}	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
史 138	2.70	540	15.1	1.50	E_{s3}^*	深灰色泥岩、灰质泥岩、砂质泥岩
史 139	2.55	950	16.2	1.70	$E_{s3}-E_{s4}$	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
坨 168	2.35	650	6.0	1.52	$E_{s2}-E_{s3}^*$	砂质泥岩、深灰色泥岩、灰质泥岩
坨 717	2.38	780	8.3	1.78	E_{s3}	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
坨 718	2.50	760	4.5	1.89	E_{s3}	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
王 550	3.13	610	15.1	1.71	$E_{s3}^*-E_{s3}^*$	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩
辛斜 159	2.40	820	6.9	1.89	E_{s3}	深灰色泥岩、灰质泥岩、砂质泥岩
营 400	2.70	500	10.4	1.88	$E_{s3}^*-E_{s3}^*$	深灰色泥岩、砂质泥岩、油页岩
营 691	2.35	770	10.5	1.79	E_{s3}	深灰色泥岩、砂质泥岩、灰质泥岩

注:岩性构成一栏中排在前面的岩性含量高于后面的。

超压顶界面主要位于沙三中亚段,与该段特殊的岩性构成是密不可分的。沙三中亚段沉积时期,东营凹陷处于由断陷的鼎盛期向稳定期转化的过渡时期,气候湿润,湖水较深且广,可容空间大;湖盆边缘的同沉积断层频繁活动,为凹陷提供了充足的陆源碎屑沉积物,在凹陷中心的广大地区沉积了大套以块状层理为主的深灰色泥岩、灰质泥岩及砂质泥岩的特殊岩性组合^[17]。

为了明确封闭层的性质与其能封闭的最大压力系数的关系,笔者还对表 1 中的各类参数进行了分类统计(图 5),由图 5 可知:①在以非渗透性的泥岩作为封闭层的条件下,超压顶界面的埋藏深度与超压封闭层所能封闭的最大压力系数之间具有良好的正相关关系,即超压顶界面埋藏越深,其所能封闭的最大压力系数越大;②东营凹陷古近系超压封闭层的厚度均大于 400 m,封闭层的厚度越大,其所能封闭的最大压力系数有增大的趋势(利 912 井除外,其原因可能是超压流体的释放);③构成封闭层的砂泥比也是影响封闭层封闭性能的一类重要参数,根据笔者的统计结果,超压的封闭层的砂泥比小于 16%,砂泥比的高低与最大压力系数相关性较差,但能封闭最大压力系数超过 1.75 的封闭层其砂泥比均低于 12%。

东营凹陷各次级洼陷中心的超压顶界面埋藏最深,作为封闭层的泥质沉积物的厚度最大、且砂泥比含量最低,其能封闭的最大压力系数也最大,这就从超压的保存机制上解释了图 1 中强超压总是分布于

各次级洼陷中心的原因。

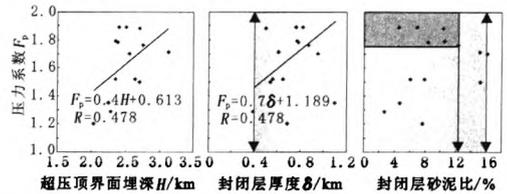


图 5 东营凹陷封闭层的埋深、厚度及砂泥比与其能封闭的最大压力系数的关系

Fig.5 Buried depth, thickness and sand-clay ratio of overpressure seal vs maximum coefficient of formation pressure in Dongying depression

4.2 沉积速率

前人总结东营凹陷超压的增因机制有欠压实、生烃作用、黏土矿物脱水及水热膨胀,其中欠压实和生烃作用是主要的增压机制,二者对超压形成的贡献表现出阶段性差异^[18]。由于超压开始形成的时间为沙三上亚段沉积期,早于洼陷内烃源岩的主生油期,说明超压最初形成的主要增压机制是欠压实,而生烃作用则是后期超压强度进一步增大的主要原因。现今常压地层过渡到超压地层最先是由于欠压实作用所致^[18],即超压顶界面之下为欠压实地层。因此,从时间和空间的角度分析,欠压实是与超压顶界面联系最紧密的因素,导致欠压实产生的地质条件在一定程度上也控制了超压顶界面的分布。

欠压实的实质是孔隙流体排出受阻,造成孔隙水排出受阻的诱导机制是形成欠压实的关键。沉积速率直接决定着上覆地层负荷应力的增大速度和地

层孔-渗条件变差的速度,是产生欠压实的一个重要条件。张守春^[19]综合欠压实、生烃作用及抬升剥蚀等3方面因素恢复了樊4井不同地层单元的剩余压力演化史(图6),从中可以看出,在东营组抬升前,沉积速率与剩余压力演化具有较好的相关性,而在这之后二者的相关性较差,说明东营组抬升前的持续快速沉积作用,是导致欠压实形成并在一定程度上控制超压顶界面分布的主要因素。

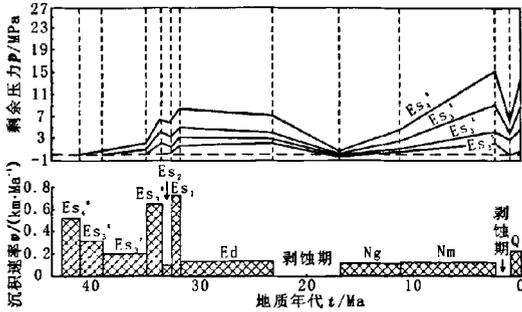


图6 樊4井剩余压力与沉积速率的演化关系^[19]

Fig.6 Evolution of excess pressure vs sedimentation speed of well Fan 4

4.3 抬升剥蚀

岩层在上升并遭受剥蚀的过程中,岩石和流体均发生一定的回弹,造成孔隙流体压力的减小,其减小的幅度与剥蚀厚度及岩石、流体的压缩系数有关^[18]。假设超压封闭层的封闭性能足够好,抬升后的超压系统仍然为一个独立的系统,超压顶界面必然变浅。东营凹陷在地质历史时期曾遭受过两次构造抬升运动,其中东营运动距今较远,其造成的超压顶界面变化已经被后期沉积的地层所抵消,对现今的超压顶界面分布影响较小;距今较近的一次构造运动发生在明化镇末期,各构造区剥蚀量较均衡,平均为129 m^[19],加上第四系平原组沉积较薄,因此该期的构造抬升使得现今的超压顶界面整体变浅。

4.4 断裂活动

超压是沉积盆地演化过程中孔隙流体滞留引起的非平衡状态,其形成受多种因素的控制,已发育的超压亦可由地质条件的变化而泄漏和消失^[20]。由于外力作用或超压流体依靠自身的能量导致新断裂的产生以及使先存的具有封闭能力的断裂再活动,超压流体会沿断层面上运移,但由于其上覆地层含多个泥岩段,这样上覆泥岩地层又形成新的封闭层,但后者的超压顶界面的埋深明显变浅^[9-10]。断裂活动是造成胜坨、纯化及小营地区超压顶界面埋深变浅的一个重要原因^[6]。东营凹陷辛154井区超

压顶界面埋藏深度明显小于其周围地区,究其原因最可能是陈官庄—王家岗断裂带内的断层活动所致。

4.5 盐底辟作用

盐、泥的底辟构造是超压释放的重要途径,受底辟作用的影响超压流体可沿相关的断裂和裂隙向上运移,当上覆地层又形成新的封闭层时,其超压顶界面的埋藏深度较之前明显变浅^[10]。东营凹陷在孔店组上段和沙四下亚段夹有咸水湖泊的盐膏岩沉积,含盐沉积分布在凹陷的各构造单元中,其中底辟作用主要发生于中央隆起带。中央隆起带超压顶界面的埋深明显小于其相邻地区,主要与盆地边缘主控断裂的拆离导致的伸展断弯褶皱作用和底辟作用有关^[9]。

5 结论

(1) 东营凹陷超压顶界面的分布不具有“等深性”,其埋藏深度在凹陷中心深而在凹陷边缘较浅,但在凹陷中心的隆起区超压顶界面的埋藏深度较其周围浅。

(2) 东营凹陷超压顶界面的分布具有一定的“层控性”,超压顶界面通常位于沙三中亚段,在地震反射剖面上位于T₄与T₆反射界面之间。

(3) 东营凹陷超压顶界面之下的岩层为一套以深灰色泥岩、灰质泥岩及砂质泥岩为主的泥质岩组合,泥质岩的岩性构成及沉积速率在一定程度上控制超压顶界面的层位分布,而抬升剥蚀、断裂活动及盐底辟作用是造成部分地区超压顶界面变浅的主要因素。

参考文献:

[1] BRADLEY J S. Abnormal formation pressure [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 957-973.
 [2] HUNT J M. Generation and migration of petroleum from abnormal pressure fluid compartment [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
 [3] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85. HAO Fang, DONG Wei-liang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 79-85.
 [4] 张义纲, 张抗, 胡惕麟, 等. 天然气的生成聚集和保存 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1991.
 [5] 杨智, 何生, 何治亮, 等. 准噶尔盆地腹部超压层分

- 布与油气成藏[J]. 石油学报, 2008, 29(2):199-205.
- YANG Zhi, HE Sheng, HE Zhi-liang, et al. Distribution of overpressure stratum and its relationship with hydrocarbon accumulation in the central part of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2):199-205.
- [6] 隋风贵. 东营断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):17-22.
- SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3):17-22.
- [7] 刘震, 许晓明, 谢启超, 等. 渤海湾盆地异常高压晚期形成特征分析[J]. 现代地质, 2006, 20(2):259-267.
- LIU Zhen, XU Xiao-ming, XIE Qi-chao, et al. Analysis on late origin of overpressure in Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2006, 20(2):259-267.
- [8] 陈中红, 查明. 东营凹陷烃源岩超压封存箱与油气聚集[J]. 沉积学报, 2006, 24(4):607-615.
- CHEN Zhong-hong, ZHA Ming. Over-pressured fluid compartment and hydrocarbon migration and accumulation in Dongying depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4):607-615.
- [9] 解习农, 刘晓峰. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2):103-108.
- XIE Xi-nong, LIU Xiao-feng. Related to black shale series fluid dynamic system and relationship with accumulation of hydrocarbon in overpressured basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2000, 19(2):103-108.
- [10] 刘晓峰, 解习农. 超压释放及其对油气运移和聚集的意义[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4):51-56.
- LIU Xiao-feng, XIE Xi-nong. Overpressure relief and its implication to hydrocarbon migration and accumulation [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(4):51-56.
- [11] 刘晓峰. 超压传递:概念和方式[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6):533-536.
- LIU Xiao-feng. Overpressure transference; concept and ways [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(6):533-536.
- [12] 王志战. 沉积盆地异常压力体系及其预监测;以济阳坳陷为例[D]. 西安:西北大学地质学系, 2006.
- WANG Zhi-zhan. Abnormal pressure regimes in sedimentary basins and their prediction and detection; a case in Jiyang Basin [D]. Xi'an: Department of Geology in Northwest University, 2006.
- [13] HERMANRUD C, WENSAAS L, TEIGE G M G, et al. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) show no influence of overpressureing [C]//LAW B E, ULMISHEK G F, SLAVIN V I. Abnormal pressures in hydrocarbon environments. AAPG Memoir, 1998, 70:65-85.
- [14] TEIGE G M G, HERMANRUD C, WENSAAS L. et al. The lack of relationship between overpressure and porosity in North Sea and Haltenbanken shales [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(4):321-335.
- [15] 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 Zhi-liang, 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 Geoscience, 2009, 34(3):457-470.
- [16] 杨蛟, 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 Bing-jie. Characteristics and prediction model of overpressures in the Niuzhuang sag of Dongying depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(4):34-40.
- [17] 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [18] 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 Shan-wen, ZHANG Lin-ye, ZHANG Shou-chun, 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.
- [19] 张守春. 东营凹陷异常压力形成机制及其与成烃成藏的关系[D]. 青岛:中国石油大学地球科学与技术学院, 2010.
- ZHANG Shou-chun. The relationship between the mechanism of abnormal pressure formation and hydrocarbon generation and entrapment in the Dongying depression [D]. Qingdao: School of Geosciences in China University of Petroleum, 2010.
- [20] 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.

(编辑 徐会永)