

渤海湾盆地东濮凹陷压力演化与超压形成机制

孙 波^{1,2}, 蒋有录¹, 石小虎³, 刘景东⁴, 郝建光¹

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015; 3. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021;
4. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:通过实测压力、泥岩声波时差、流体包裹体古压力恢复及盆地模拟,对东濮凹陷北部地区地层压力的演化和现今压力特征进行分析,结合岩心观察解析超压的形成机制,探讨不同机制对超压的贡献率。结果表明:剩余压力的演化经历“超压原始积累-超压释放-超压重新形成”3个阶段,两次超压的形成时期与油气成藏的时期相对应;古今超压的空间展布均受构造格局、断裂活动和膏盐岩分布的控制,洼陷带以及盐下、盐间地层的剩余压力较大;超压的形成主要为欠压实作用、生烃作用及膏盐岩作用的结果,生烃作用对超压的贡献率与烃源岩的热演化相关。

关键词:东濮凹陷; 超压; 膏盐岩; 压力演化; 形成机制

中图分类号:TE 122.3

文献标志码:A

Pressure evolution and formation mechanism of overpressure in Dongpu depression, Bohaiwan Basin

SUN Bo^{1,2}, JIANG You-lu¹, SHI Xiao-hu³, LIU Jing-dong⁴, HAO Jian-guang¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Geo-Science Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;
3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China;
4. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214126, China)

Abstract: The pressure evolution and present pressure characteristics in north part of Dongpu depression were analyzed based on the measured pressure, mudstone sonic log interval, the pressure recovery by fluid inclusions and basin modeling. The overpressure formation mechanism was analyzed combined with core observation, and the contribution rate of hydrocarbon generation on the overpressure caused by different mechanisms was discussed. The conclusions are as follows. Firstly, that residual pressure evolution experienced three stages: primitive accumulation-release-reform, and two overpressure formation periods are corresponded with the oil and gas accumulation period. Secondly, the distribution of paleo-pressure and present pressure are controlled by tectonic framework, fault activity and plaster salt-gypsum rock distribution. Moreover, the formation in subsag belt or below/between the salt-gypsum rock developed larger residual pressure. Lastly, overpressure formation is mainly caused by compaction disequilibrium, hydrocarbon generation and salt-gypsum rock effect. In addition, the contribution rate of hydrocarbon generation on the overpressure is related to the thermal evolution of source rocks.

Key words: Dongpu depression; overpressure; salt-gypsum rock; pressure evolution; formation mechanism

渤海湾盆地异常压力广泛发育,发育程度不同的超压体系控制了不同构造带上油气成藏过程^[1-5]。东濮凹陷位于渤海湾盆地南缘临清坳陷的东南部,是一个“东断西超、两洼一隆一斜坡”的箕状断陷盆地,其北部地区古近系沙河街组发育多套厚层膏盐

岩,由于这类岩层热导率高、塑性好、流动性强,易在邻近各层位发育地层超压,促进了油气的生排运聚过程^[6-9]。笔者利用流体包裹体及盆地模拟技术针对膏盐发育区古超压的形成与演化进行恢复,并通过实测压力与泥岩声波时差法分析现今压力特征与

超压形成机制,定量计算不同机制对超压形成的贡献率,有助于分析油气成藏过程与成藏机制,指导油气勘探。

1 古压力恢复与演化

沉积盆地的古压力研究已成为盆地分析与研究中的重要组成部分,在油气勘探中起着越来越重要的作用。目前古压力恢复的方法主要有流体包裹体法^[10-12]、盆地模拟法^[13-14]、黏土矿物法^[15]、声波时差法^[16]等。

1.1 流体包裹体恢复古压力

根据研究区的地质背景,选择位于北部地区不同构造带上沙二、三段储层流体包裹体样品进行荧光观察、流体包裹体显微测温、测盐等系统分析,综合利用四史以及均一温度-盐度法,恢复研究区的油气成藏时间和古地层压力,即

$$p=A_1+A_2T.$$

其中

$$A_1=6.1\times10^{-3}+(2.385\times10^{-1}-a_1)T_h-(2.855\times10^{-3}+a_2)T_h^2-(a_3T+a_4T_h^2)m,$$

$$A_2=a_1+a_2T_h+9.888\times10^{-6}T_h^2+(a_3+a_4T_h)m.$$

式中, p 为古压力, 10^{-1} MPa; T_h 为均一温度, $^{\circ}\text{C}$; T 为捕获温度,视为比均一温度高 15°C ; m 为盐类质量摩尔浓度, mol/kg ; m 与盐度($w/\%$)的换算公式为

表 1 东濮凹陷北部地区盐水包裹体古压力计算结果

Table 1 Computation results of paleo-pressure of salt water inclusions in north part of Dongpu depression

分布	构造位置	与膏盐岩配置关系	井号	现今埋深 H/km	层位	均一温度 $T_h/^{\circ}\text{C}$	含盐度 $w/\%$	盐水溶液密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	捕获温度 $T/^{\circ}\text{C}$	捕获压力 $P_{\text{捕}}/\text{MPa}$	古埋深 h/km	地质时间 t/Ma	古剩余压力 $P_{\text{剩}}/\text{MPa}$	古压力系数 α_p
浅部 层系	濮卫结合部	盐间	文 158	2.371 0	沙二上	107.8	8.28	1.01	123	39.86	2.386	26.9	14.14	1.55
	文东	盐间	文 10-3	2.236 4	沙三中	145.2	0.88	0.94	160	35.62	2.402	27.2	13.50	1.61
	卫城	盐间	卫 50	2.737 0	沙三下	126.5	13.50	1.03	141	39.28	2.779	28.8	11.16	1.40
深部 层系	文东	盐间	文 203-59	4.182 9	沙三中	135.2	5.26	0.97	150	37.21	2.765	6.5	10.93	1.42
		盐下	濮深 7	4.156 9	沙三下	153.6	3.06	0.94	169	35.32	3.140	5.6	6.39	1.22
	户部寨	盐下	濮 97	3.120 0	沙三下	133.2	10.50	1.01	148	38.28	2.883	27.3	9.74	1.34
		盐下	卫 50	2.924 0	沙三下	126.5	13.50	1.03	142	39.28	2.786	26.9	11.16	1.40
	卫城	盐下	卫 42	3.446 0	沙三中	127.8	17.10	1.06	143	39.88	2.759	4.1	11.22	1.39
		盐下	文 250	3.605 8	沙三中	132.5	22.60	1.10	148	40.88	2.803	27.0	10.66	1.35
	文西	无盐区	文 243	4.273 5	沙三中	158.2	7.73	0.97	173	35.97	3.488	23.1	2.81	1.08
		无盐区	文 153	3.778 7	沙三中	139.8	21.90	1.09	155	40.43	3.064	3.5	7.70	1.24
	刘庄	无盐区	刘 20	3.554 2	沙二下	147.5	6.30	0.97	163	36.44	3.018	27.3	7.75	1.27
		无盐区	刘 7	3.525 3	沙二下	145.6	12.50	1.01	161	37.88	2.966	27.2	8.52	1.29

1.2 盆地模拟恢复压力演化

通过流体包裹体计算古压力的校正,对古压力的演化进行模拟恢复(图 1)。本区剩余压力的形成

$m=1\,000\,w/[58.5(100-w)]$; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为常数,对于 $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系, $a_1=2.848\times10^{-1}$, $a_2=-6.445\times10^{-2}$, $a_3=-4.159\times10^{-1}$, $a_4=7.438\times10^{-3}$ 。

古压力系数和古剩余压力分别为

$$\alpha_p=p-p_0=p-\rho gh/1\,000,$$

$$p_{\text{剩}}=p/p_0=1\,000p/(\rho gh).$$

式中, α_p 为古压力系数; $p_{\text{剩}}$ 为古剩余压力, MPa; p_0 为古静水压力, MPa; h 为古埋深, 其值是在单井埋藏史及热史恢复的基础上结合包裹体均一温度实测值得到, m; g 为常数, $9.8\,\text{m/s}^2$; ρ 为盐水包裹体的流体溶液密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

表 1 是对东濮凹陷北部地区多口井不同层段盐水包裹体古压力的计算结果。流体包裹体均一温度及荧光颜色分析表明,沙二段、沙三段储层的成藏期次分为两期,不同地区略有区别,大多为东营组沉积末期(26.9~28.8 Ma)和明化镇组沉积期至今(6.5~0 Ma)两期,部分为东营组抬升期(23.1 Ma)。膏盐岩发育区的流体包裹体古剩余压力和古压力系数较高,其中位于砂泥岩与厚层膏盐岩互层中的包裹体古剩余压力分布于 10.93~14.14 MPa,古压力系数分布于 1.4~1.61;位于膏盐岩层下的包裹体古剩余压力分布于 6.39~11.22 MPa,古压力系数分布于 1.22~1.4;位于无盐区的包裹体古剩余压力分布于 2.81~8.52 MPa,古压力系数分布于 1.08~1.29。

与演化受构造格局、断裂活动和岩性分布控制明显,整体上存在超压原始积累-超压释放-超压重新形成 3 个阶段,表现出低-高-低-高的变化趋势,且两

次超压的形成时期都对应着地层的快速沉积期,也与两次油气成藏的时期相吻合。

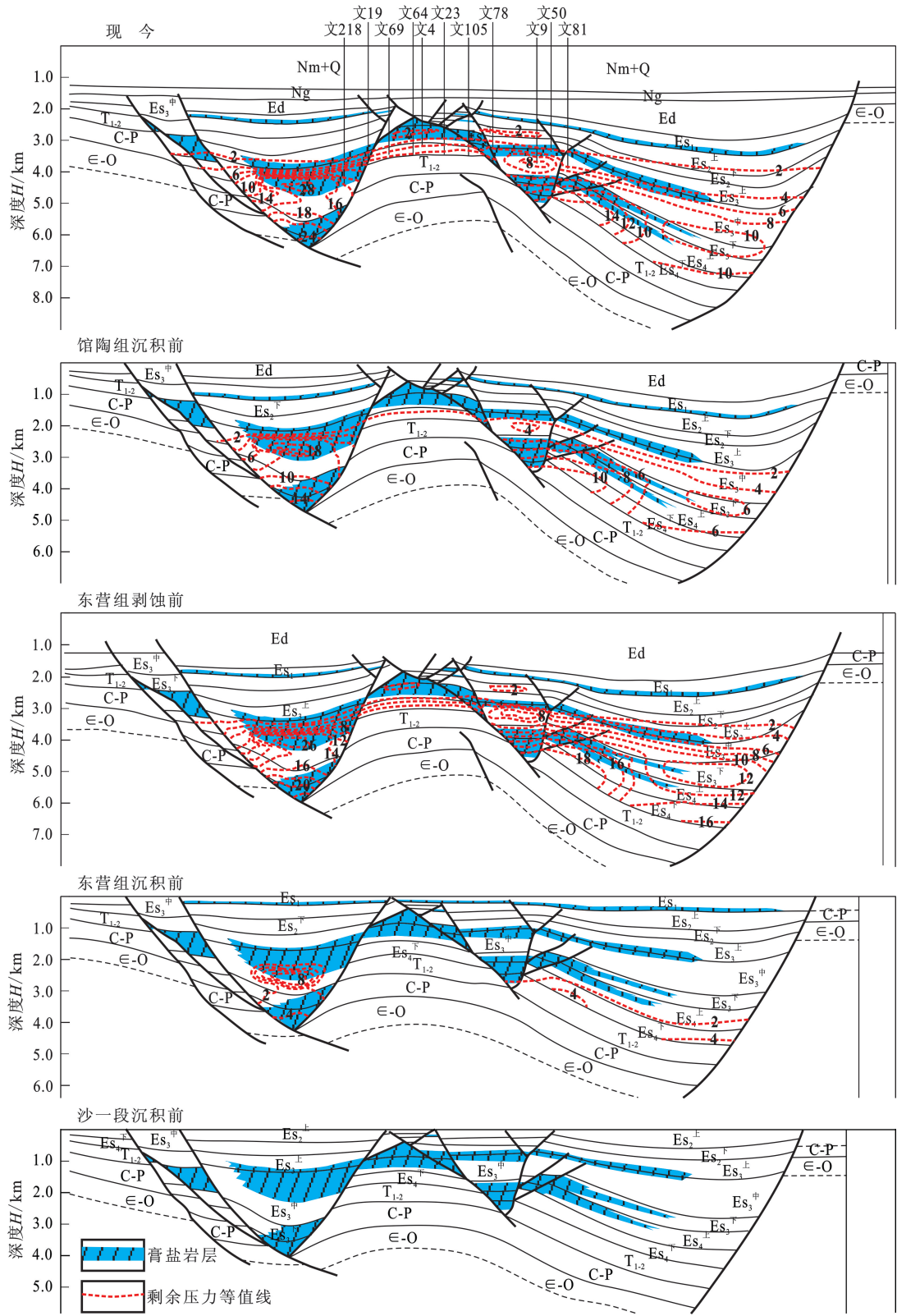


图 1 东濮凹陷北部剩余压力演化典型剖面

Fig.1 Typical evolution section of residual pressure in north part of Dongpu depression

东营组沉积前,断裂活动强烈,保存条件差,仅在洼陷带中心及盐岩厚值区保留了较小的剩余压力。东营组沉积末期,地层快速沉积,同一深度下多套盐岩发育的文留断裂带相对柳屯洼陷和前梨园洼

陷剩余压力偏高,同一地层中沉降较快的洼陷区高于断裂带,在大套沙三段盐的盐下及盐间剩余压力较高,如柳屯洼陷沙三中盐间地层、文留地区沙三下盐下地层形成明显的超压带。东营剥蚀末期超压受构造抬升作用影响而明显减弱,盐间或盐下地层和洼陷区剩余压力减小,现今剖面上剩余压力的分布与东营沉积末期的格局一致,超压幅度偏低于东营沉积末期。

2 现今压力分布特征

根据随钻及试油地层压力测试资料校正,利用声波时差法计算研究区古近系现今地层压力。实测压力的变化特征为地层压力由浅到深不断增大,存在明显的分带,沙一段及以上地层基本上为常压,超压分布于沙一段及沙三段以下地层,在深层存在超压减弱现象。全区大范围出现超压的深度为 3.0 km,与烃源岩大量生烃的热演化深度十分吻合(图 2)。

压力平面分布的整体格局与构造格局、沉降中心相对应,具有东南部高西北部低、东西分异的特点,高压、超高压主要分布在深洼部位和构造高部位的翼部,如文东、前梨园、海通集等地区,超高压区局限于洼陷深处,控洼断层附近及构造抬升区多为常压—弱超压,如濮城地区、卫城地区、西斜坡地区基本为常压区。沙一下亚段、沙三中亚段和沙三下亚段盐岩厚度大、分布广,其沉积展布对地层超压的分布范围具有控制作用,而沙二段和沙三上亚段的盐岩厚度小,分布范围狭小,对于超压控制作用弱,只

体现在局部(图 3)。沙三下亚段盐岩厚度大、分布广,集中发育于中央隆起带,文中、文东地区盐岩厚度为 300~600 m,由于膏盐岩广泛发育,东洼的压力系数最大值和超高压的分布范围要明显大于西洼。中央隆起带埋深较浅、断裂发育,欠压实作用不如洼陷中心显著,但在多套盐岩覆盖的中央隆起带各层系均见超压分布,而无盐发育的西部斜坡带为常压。沙二段、沙三上亚段盐岩仅在局部发育,主要分布在柳屯洼陷、户部寨地区、濮卫洼陷带,压力系数高值区与膏盐岩厚度较厚区域较吻合。文中地区和户部寨地区未见该套盐岩,其沙三上亚段底部为正常压力,与户部寨地区的压力分布差异明显,证实膏盐岩对于超压的控制作用。

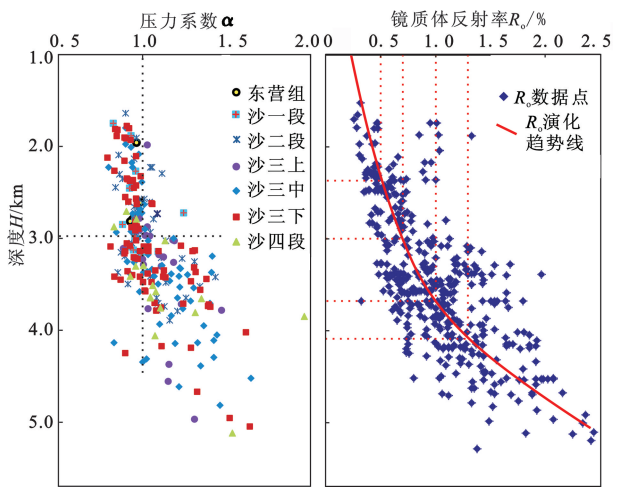


图 2 东濮凹陷北部实测压力系数与 R_r 演化特征

Fig. 2 Character of measured pressure coefficient and R_r evolution in north part of Dongpu depression

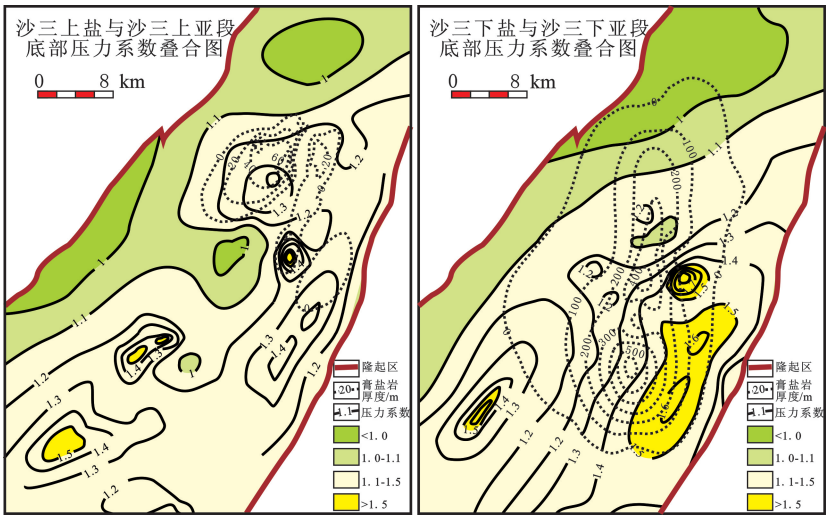


图 3 东濮凹陷北部各层系膏盐岩发育与下部超压平面分布叠合图

Fig. 3 Overlap map of distribution of overpressure and distribution characteristics of salt-gypsum rocks in north part of Dongpu depression

3 超压形成机制

目前认为的超压形成机制可归纳为岩石孔隙体积的变化、孔隙流体体积的变化和流体的运动三类^[17]。研究区的超压主控因素为欠压实作用、生烃作用以及膏盐岩的作用,黏土矿物脱水作用的影响较小^[18]。

3.1 欠压实作用

碎屑岩沉积物快速沉降过程中,由于孔隙流体排出受阻,流体将承担一部分负荷压力,使得流体压

力高于静水压力形成超压,即欠压实作用^[1]。在欠压实作用下,超压发育区与沉降中心相对应,沉降速率大、埋藏较深的区域超压程度较大,沉降速率较小、埋藏浅的区域超压程度小或无超压。在纵向上,相继出现的正常压实带和欠压实带,较好地对应着正常压力带和超压带,其间以封隔层相隔,分带明显(图 4)。东濮凹陷超压的演化过程中,伴随着盆地快速沉降,欠压实作用显著,超压形成并积累,东营组剥蚀期构造抬升导致欠压实减弱,超压释放。

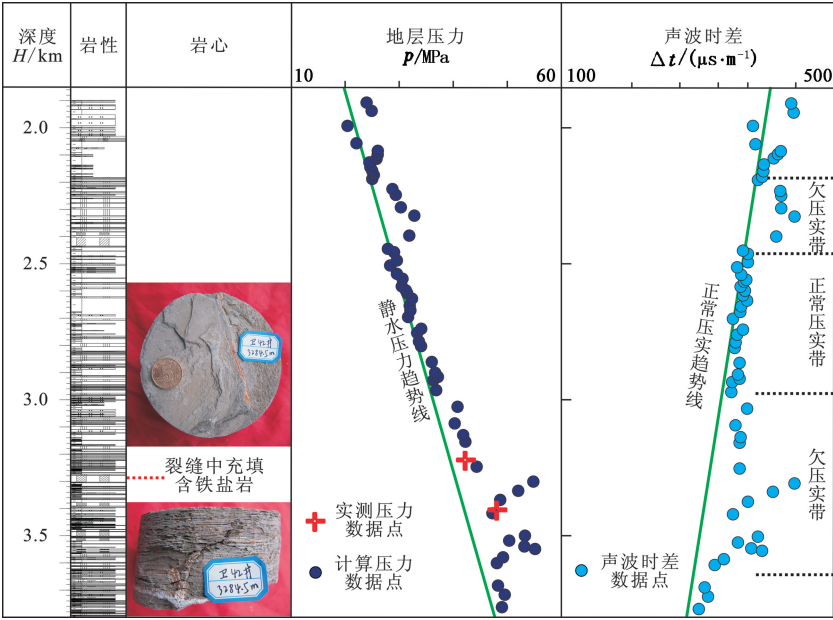


图 4 地层压实、超压特征与膏盐岩发育的关系(卫 42 井)

Fig. 4 Compaction & overpressure characteristics and their relationships with the distributions of salt-gypsum rocks(well Wei42)

在盐岩发育区,膏盐岩具有较好的延展性和较高的排替压力,是极佳的封隔层,且封存效果受深度和膏盐岩厚度影响小,盐间超压要显著大于盐下超压(图 5)。当受到构造挤压作用时,超压地层中易形成断层和裂缝,使地层超压消散,由于膏盐层塑性强、易流动,尤其在温度增加时塑形明显变好,易涂抹或充填断层和裂缝(图 4),有利于超压的保存。利用实测压力数据,拟合研究区含盐区沙三段膏盐岩对超压的贡献率公式,并计算该层段的贡献率为 53.7% ~ 27.1%,随深度加深有逐渐减小的趋势。

膏盐岩对超压的贡献率为

$$C_{\text{盐}} = (p_{\text{含盐}} - p_{\text{无盐}}) / p_{\text{含盐}} - \rho_w g H. \quad (4)$$

式中, $C_{\text{盐}}$ 为膏盐岩对超压形成的贡献率; $p_{\text{含盐}}$ 为含盐区段地层压力, MPa; $p_{\text{无盐}}$ 为无盐区段地层压力, MPa; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 。

3.2 生烃作用

东濮北部地区常压向高压转换的深度,与有机物质热演化达到成熟阶段的深度吻合较好(3.0 ~ 4.0 km, R_o 相当于 0.7% ~ 1.3%),且有机质生烃高峰对应的深度约为(3.750 km, $R_o = 1.0\%$)与异常压力的高峰期对应关系较好(图 2)。在良好的封闭条件下,烃类无法及时排出,引起孔隙流体体积的大量增加,促使超压形成。

为了定量研究生烃增压与欠压实增压的贡献率,同时消除膏盐岩厚度不均的影响,笔者以无盐区沙三段地层作为研究对象,分别在远离生烃中心、海通集洼陷、前梨园洼陷选 4 ~ 5 口井计算其泥质地层压力,绘制成随深度变化的散点图,分别对应欠压实、海通集、前梨园,并拟合公式(图 6)。正常压实阶段地层压力与静水压力一致,随着埋深的增加,地层逐渐出现超压,由于远离生烃中心的地层生烃能

力较差,超压成因主要以欠压实为主。海通集洼陷和前梨园洼陷的有机质分别在 3.0 和 2.7 km 进入生烃高峰,镜质体反射率 R_o 约为 0.7,由于生排烃过程中孔隙流体大量增加,使得地层压力显著增大。

随着埋深继续增大,因成岩作用增强,欠压实作用导致的超压增量有衰减现象,而生烃作用一直伴随着烃源岩生烃的过程延续。

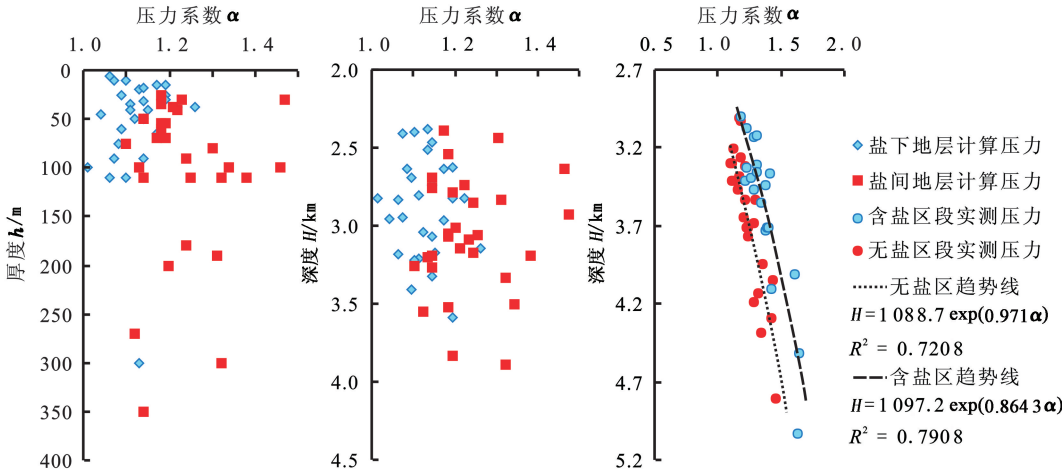


图 5 膏盐岩与超压发育关系散点图

Fig. 5 Distribution scatter between salt-gypsum rocks and overpressure development

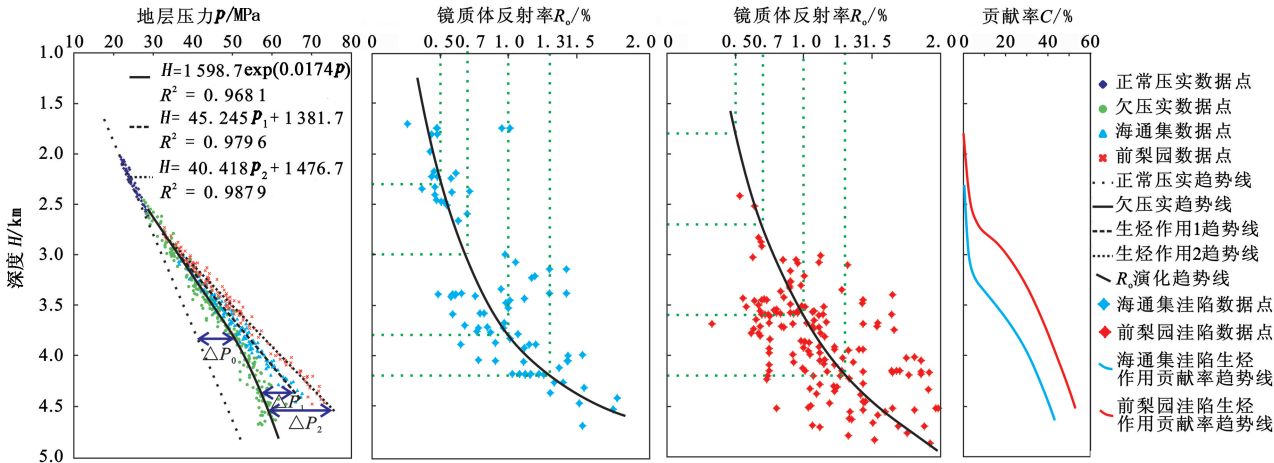


图 6 东濮凹陷北部沙三段增压机制模式

Fig. 6 Pressurization mechanism mode of Es₃ in north part of Dongpu depression

通过拟合公式计算研究区沙三段地层欠压实作用和两个主要洼陷的生烃作用分别对超压的贡献率。生烃作用对超压的贡献率随深度增大而逐渐增加,其趋势在热演化进入生烃高峰时剧增,由于前梨园洼陷的生烃能力强于海通集洼陷,其贡献率较高,前者为 0~52.2%,后者为 0~40.2%。

欠压实作用增量为

$$p'_0 = 57.47 \ln (H/1598.7) - \rho g H; \quad (5)$$

海通集增量为

$$p_1 = (H - 1381.7) / 45.245 - 57.47 \ln (H/1598.7); \quad (6)$$

前梨园增量为

$$p_2 = (H - 1476.7) / 40.418 - 57.47 \ln (H/1598.7); \quad (7)$$

超压贡献率为

$$C = p / (p - \rho g H). \quad (8)$$

式中, p'_0 为欠压实作用增量, MPa; p_1 为海通集洼陷生烃作用增量, MPa; p_2 为前梨园洼陷生烃作用增量, MPa。

由于盐岩相对其他岩性热导率较高,生热率较低,使得深部地温容易传到浅部,从而导致盐上地层地温梯度偏大于无盐地层,出现异常高温,而盐下地层地温梯度偏小于无盐地层,出现异常低温^[7];导致盐上的烃源岩热演化程度相对偏高,盐下的热演

化程度相对偏低。这在一定程度上扩大了烃源岩生烃的深度范围,促进了生烃增压作用。

4 结 论

(1) 东濮凹陷北部地区剩余压力的形成与演化整体上经历“超压原始积累-超压释放-超压重新形成”三个阶段,两次超压的形成时期与油气成藏的时期相对应,为油气成藏提供了动力条件。古今超压的空间展布均受构造格局、断裂活动和膏盐岩分布的控制,超压在纵向上随深度增加而增大,平面上主要分布于洼陷带及周边且受膏盐岩发育的控制明显,膏盐岩下伏地层超压显著。

(2) 研究区现今超压形成的主控因素为欠压实作用、生烃作用以及膏盐岩的封存作用,欠压实的贡献率为100%~40%。生烃作用对超压的贡献率随烃源岩热演化程度增高而增大,在中深层或洼陷中心其对超压的贡献率可超过50%。古近系沙河街组发育的多套厚层膏盐岩对超压封存和生烃作用有积极贡献,其贡献率为53.7%~27.1%,随深度增加而逐渐减小,但封存压力的效果受埋深和厚度影响较小,盐间超压要明显大于盐下超压。

参考文献:

- [1] 解习农,李思田,刘晓峰. 异常压力盆地流体动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2006.
- [2] 张启明,董伟良. 中国含油气盆地中的超压体系[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 1-11.
ZHANG Qi-ming, DONG Wei-liang. Overpressure system of hydrocarbon-bearing basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 1-11.
- [3] 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): 509-515.
CHEN Zhong-hong, ZHA Ming. Distribution characteristics of overpressure and its controlling to hydrocarbon accumulation in terrigenous faulted basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 509-515.
- [4] 刘士林,郑和荣,林舸,等. 渤海湾盆地东营凹陷异常压力分布和演化特征及与油气成藏关系[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 233-237.
LIU Shi-lin, ZHENG He-rong, LIN Ge, et al. Distribution and evolution characteristics of abnormal pressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in the Dongying sag of Bohai Bay Basin. [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 233-237.
- [5] 刘华,蒋有录,宋国奇,等. 渤海湾盆地东营凹陷沙四下亚段地层压力演化与天然气成藏[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 197-203.
- LIU Hua, JIANG You-lu, SONG Guo-qi, et al. Pressure evolution and gas accumulation of the fourth member of the Shahejie formation in Dongying depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 197-203.
- [6] 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 Xin-ke, XU Hua-zheng. Discussion on geological features of Dongpu depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 20-26.
- [7] 孙波,蒋有录,张善文,等. 东濮凹陷北部膏盐岩分布特征及其对地层温度的影响[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 28-30.
SUN Bo, JIANG You-lu, ZHANG Shan-wen, et al. Distribution characteristics of salt and its influence to the geo-temperature in north part of Dongpu depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 28-30.
- [8] 罗权生,荆文波,聂朝强. 台北凹陷第三系膏盐岩对油气运聚的意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 29-31.
LUO Quan-sheng, JING Wen-bo, NIE Chao-qiang. Significance of the Tertiary plaster salt rock in Taibei depression to migration and accumulation of hydrocarbon [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(1): 29-31.
- [9] 万桂梅,汤良杰,金文正,等. 盐岩在库车坳陷中的作用[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2008, 30(1): 14-17.
WAN Gui-mei, TANG Liang-jie, JIN Wen-zheng, et al. Function of salt rock in Kuqa sag[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(1): 14-17.
- [10] 刘德汉,卢焕章,肖贤明. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用[M]. 广州:广东科技出版社, 2005.
- [11] 米敬奎,肖贤明,刘德汉,等. 利用储层流体包裹体的PVT特征模拟计算天然气藏形成的古压力:以鄂尔多斯盆地上古生界深盆地气藏为例[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(7): 679-685.
MI Jing-kui, XIAO Xian-ming, LIU De-han, et al. The ancient pressure of gas accumulation simulated by the PVT characteristic of reservoir fluid inclusions: taking deep basin gas of the upper Proterozoic in Ordos Basin for example [J]. Science in China (ser D), 2003, 33(7): 679-685.
- [12] 李静,查明. 基于流体包裹体的任丘油田迷雾山组成

- 藏期次确定与古压力恢复[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):38-43.
- LI Jing, ZHA Ming. Determination of oil accumulation period and building up of paleopressure of Wumishan formation in Renqiu Oilfield by using fluid inclusion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):38-43.
- [13] 李善鹏,邱楠生. 利用盆地模拟方法分析昌潍拗陷古压力[J]. 新疆石油学院学报,2003,15(4):5-8.
- LI Shan-peng, QIU Nan-sheng. Analyzing the paleopressure of Changwei depression by the use of basin modeling method[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003,15(4):5-8.
- [14] 曹强,叶加仁,郭飞飞,等. 伊通盆地莫里青断陷地层压力演化与油气运聚[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(4):642-649.
- CAO Qiang, YE Jia-ren, GUO Fei-fei, et al. Pressure evolution in the Moliqing fault-depression, Yitong Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009,39(4):642-649.
- [15] 邹海峰. 大港探区前第三系古流体和古温压特征及演化[D]. 长春:吉林大学地球科学学院,2000.
- ZOU Hai-feng. The characteristics and evolution of paleo-fluid and paleo-temperature-pressure of Pre-Tertiary in Dagang exploration area[D]. Changchun: College of Earth Sciences, Jilin University,2000.
- [16] 刘福宁. 异常高压区的古沉积厚度和古地层压力恢复方法探讨[J]. 石油与天然气地质,1994,15(2):180-185.
- LIU Fu-ning. An approach to reconstruction of paleo-sedimentary thickness and paleo-formation pressure in abnormal high pressure region[J]. Oil & Gas Geology, 1994,15(2):180-185.
- [17] 奇林格 G V,等. 异常地层压力成因与预测[M]. 赵文智,等,译. 北京:石油工业出版社,2004.
- [18] 唐小云,龚晶晶,杨世刚,等. 东濮凹陷文留地区古近系超压成因分析[J]. 油气地质与采收率,2007,14(5):20-22.
- TANG Xiao-yun, GONG Jing-jing, YANG Shi-gang, et al. Eocene overpressure origin analysis in Wenliu area of Dongpu depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007,14(5):20-22.

(编辑 徐会永)

(上接第20页)

- [15] 刘洪涛,曾联波,房宝才,等. 裂缝对大庆台肇地区低渗透砂岩储层注水的影响[J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(4):68-71.
- LIU Hong-tao, ZENG Lian-bo, FANG Bao-cai, et al. Influence of fractures on injection for low-permeability sandstone reservoir in Taizhao area, Daqing Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(4):68-71.

(上接第27页)

- [19] 张义杰,曹剑,胡文瑄. 准噶尔盆地油气成藏期次确定与成藏组合划分[J]. 石油勘探与开发,2010,37(3):257-262.
- ZHANG Yi-jie, CAO Jian, HU Wen-xuan. Timing of petroleum accumulation and the division of reservoir-forming assemblages, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(3):257-262.
- [20] 鲁雪松,宋岩,柳少波,等. 流体包裹体精细分析在塔中志留系油气成藏中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(4):45-51.
- LU Xue-song, SONG Yan, LIU Shao-bo, et al. Detailed analysis of fluid inclusions and its application in

- [16] 刘太勋,徐怀民. 扇三角洲储层微观剩余油分布模拟试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(4):21-25.
- LIU Tai-xun, XU Huai-min. Micro-remaining oil distribution simulation test of fan delta reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(4):21-25.

(编辑 徐会永)

- accumulation history research on Silurian reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(4):45-51.
- [21] 于岚,李文涛,陈红汉,等. 临清拗陷东部石炭-二叠系流体包裹体特征及油气充注期次研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(6):26-32.
- YU Lan, LI Wen-tao, CHEN Hong-han, et al. Characteristics of fluid inclusion and hydrocarbon charging period of Carboniferous-Permian reservoirs in the eastern Linqing depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(6):26-32.

(编辑 徐会永)