

文章编号:0253-9985(2012)05-0686-09

东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因

李小强¹, 赵彦超²

(1. 中国地质大学 研究生院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:渤海湾盆地东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地普遍发育超压, 其对盐湖盆地内泥岩裂缝的形成和泥岩裂缝油藏成藏效应等具有明显的控制作用, 因此查清盐湖盆地超压成因显得尤为关键。运用地球物理和地球化学资料, 综合超压成因机理分析的各种方法, 从膏盐层与超压发育的关系进行解剖。研究结果表明, 东濮凹陷盐湖盆地在沉积速率相对较低的情况下, 膏盐层封闭作用是使欠压实成为主要超压成因机制的根本地质因素。进一步开展欠压实作用对超压的定量评价, 结果表明其贡献为53.068%~71.416%, 平均为62.758%。因此在盐湖盆地, 膏盐层强封闭作用造成的欠压实是形成超压的决定性因素, 尤其是强超压的发育受到膏盐层的控制。在盐间泥岩段由于膏盐层的影响, 生烃作用、粘土矿物脱水作用对超压的形成有一定的贡献, 但是其作用能力有限。综合研究认为, 盐湖盆地膏盐层的性质是影响和控制超压成因的关键因素。

关键词:超压成因; 欠压实; 膏盐层; 盐湖盆地; 柳屯洼陷; 东濮凹陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Overpressure genesis in the Liutun salt-lake sag, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin

Li Xiaoqiang¹ and Zhao Yanchao²

(1. Graduate School of China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Overpressure is common in the Liutun salt-lake sag in the Dongpu depression and obviously control the formation of mudstone fractures and affects the hydrocarbon accumulation in these fractured mudstone reservoirs. Therefore, it is important to look into the genesis of overpressure in the salt-lake sag. We analyzed the relationship between the gypsum and overpressure based on the geophysical and geochemical data and combined with the analysis of overpressure genesis mechanisms. The results show that the undercompaction caused by sealing process of the gypsum cap rocks was the major mechanism for the formation of overpressure in salt-lake sags of the Dongpu depression where the deposition rate was low. Further quantitative evaluation of the undercompaction indicates its contribution to the overpressure is 53.068%–71.416% (62.758% in average). This leads to a conclusion that the extensive undercompaction caused by the strong sealing capacity of gypsum cap rock in the salt-lake sag is the determinative factor of the overpressure, especially the ultra-strong overpressure. Hydrocarbon generation and clay-mineral dehydration of inter-salt mudstone also can contribute to a certain limited extent to the formation of overpressure. Based on the above analysis, we propose that the properties of the gypsum cap rocks are the pivotal factors affecting and controlling the formation of overpressure in salt-lake sags.

Key words: overpressure genesis, undercompaction, evaporite layer, salt-lake basin, Liutun sag, Dongpu depression

页岩油(气)藏是重要的非常规油气藏, 在松辽盆地、渤海湾盆地和江汉盆地等均有发现^[1]。

收稿日期: 2011-06-16; 修订日期: 2012-06-20。

第一作者简介: 李小强(1987—), 男, 硕士研究生, 能源地质工程。

东濮凹陷泥岩裂缝油藏在 30 年以前就已经被发现,但是多为油气显示,未形成产能。直到 2010 年柳屯洼陷 PS18-1 井在膏盐岩剖面中发现强超压、稠油、高产泥岩裂缝油藏,该类型油藏才引起高度重视。造成泥岩裂缝油藏上述特点的核心因素为膏盐和超压,膏盐层是超压形成的关键地质因素,而超压是泥岩裂缝油气成藏的关键要素。因此,探索超压成因对研究泥岩裂缝油藏形成机理具有重要的意义。

近年来,国内外学者密切关注超压的研究,尤其是对超压成因机制进行大量研究^[2-8]。应力作用、流体体积膨胀、流体流动是国内外学者提出的可能产生超压的主要机制^[8]。中国东部盆地受构造活动影响,总体上处于拉张背景下,沉积速率较大,快速沉积造成的欠压实作用和生烃作用是我国东部陆相沉积盆地形成超压的主要原因^[6,8-14]。然而,东濮凹陷盐湖盆地超压机制与上述明显不同。在膏盐层发育地区,超压成因主要为生烃增压和膏盐层强封闭作用^[9-10,15-17];在膏盐层不发育地区,超压成因主要为欠压实以及生烃增压作用^[9]。本文将立足于前人对中国东部盆地和东濮凹陷超压成因研究,从膏盐层的性质切入,重点探讨东濮凹陷盐湖盆地超压成因,并且定量评价欠压实对超压的贡献度。

1 地质概况

东濮凹陷位于渤海湾盆地南缘,具有“两洼夹一隆一斜坡”的构造格局,沉积了一套巨厚的以古近系和新近系为主的陆相地层,是典型的含盐断陷湖盆。柳屯洼陷位于东濮凹陷西部斜坡带,其形成和发育受西部邢庄断层和东部文西断层的控制,平面上呈以洼陷为中心的负向构造形态(图 1)。柳屯洼陷带在沙河街组三段上亚段(沙三上)时期发育盐湖相,盐湖沉积位于洼陷沉积中心,呈现出多个盐韵律段(油页岩—钙质泥岩—含膏泥岩—石膏—盐岩)叠加旋回特征。

2 盐湖盆地超压成因

2.1 欠压实对盐湖盆地超压形成的作用

产生欠压实的根本原因是地层孔隙流体无法排出,地层压实受阻,孔隙体积不能随压力变大而变小,因此欠压实带的基本特征为异常高孔隙度和异常低密度。沉积物的快速沉积是产生欠压实的地质条件。但对于沉积速率较低的盐湖盆地而言,地层欠压实的主要控制因素是封闭能力极强的膏盐层。

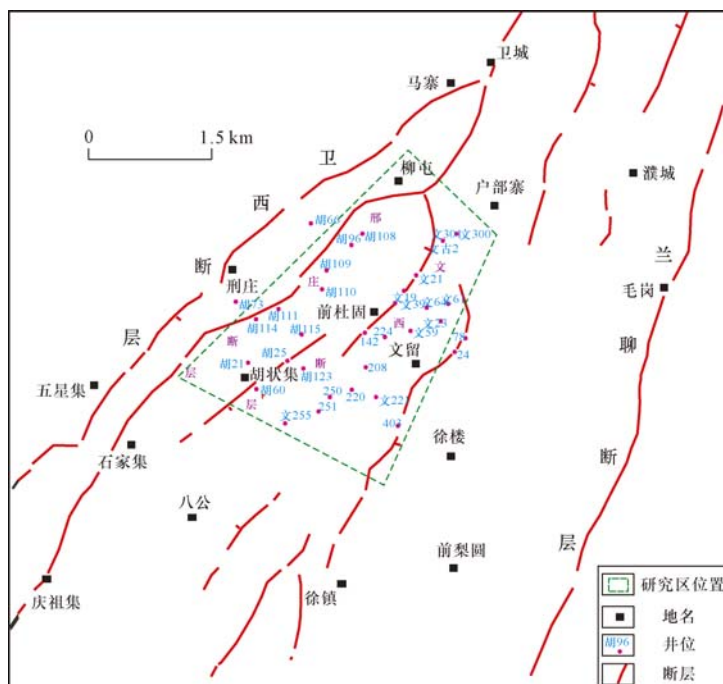


图 1 东濮凹陷西斜坡构造区块划分

Fig. 1 Structure outline map of the west slope of the Dongpu depression

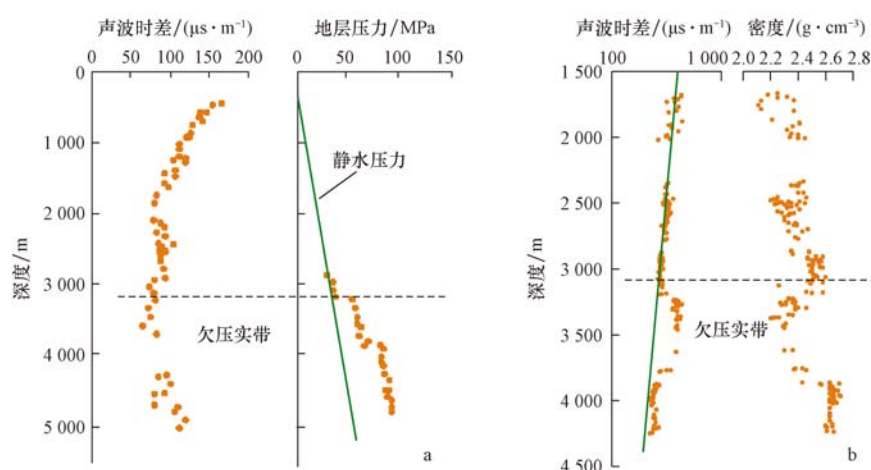


图2 不同盆地欠压实对比

Fig. 2 Comparison of undercompaction in different basins

a. 莺歌海盆地 LD30-1-1A 井^[9](修改); b. 东濮凹陷柳屯洼陷 PS18 井

2.1.1 快速埋藏导致的欠压实

莺歌海盆地是我国南海北部大陆架重要的新生代含油气盆地,其古近系、新近系的最大厚度超过 17 km,盆地具有较高的沉降-沉积速率。如图 2 可知,莺歌海盆地 LD30-1-1A 井为欠压实型超压^[9],其异常高压地层(中新统莺-黄组)年代较新,其沉积速率非常高,大于 400 m/Ma,导致流体无法及时排出而形成异常高压,其超压机制为快速埋藏导致的欠压实。

2.1.2 膏盐层强封闭性导致的欠压实

沙三上时期柳屯洼陷地层沉积厚度相差不大,一般在 400~500 m,沉积速率仅为 152 m/Ma,盐湖区泥质含量分布在 49.6%~79.63%,平均含量为 65.45%。压实特征和实测压力数据显示 PS18 井为欠压实型强超压,一方面强超压是在沉积速率很低(远小于莺歌海盆地的沉积速率)的情况下发育的,另一方面强超压的分布与盐膏岩的分布有密切的联系(图 3)。由此可以推测欠压实的形成受控于膏盐层,尤其是强超压的分布。膏盐层作为封闭性极好的盖层^[15,18-20],使得流体无法排出,有利于欠压实的形成;盐湖区岩性旋回为油页岩—钙质泥岩—含膏泥岩—硬石膏(石膏)—盐岩,石膏向硬石膏转化会释放出近一半体积的水,也会进一步增强泥岩欠压实作用。若盖层为泥岩(如 W298 井),则欠压实带内发育超压而没有强超压,主要原因是一方面沙泥岩频繁交互,泥

岩单层厚度小,压实过程中流体易于排出;另一方面,主要烃源岩沙三段埋深较大,压实程度较高^[17]。

超压及强超压在不同岩相中的分布显示出盖层性质的重要性,欠压实类型和超压大小及旋回性在不同岩相中的分布表明膏盐层对超压具有控制作用。强超压的形成一方面受控于沉积速率,另一方面在盐湖盆地中,由于膏盐层的存在,即使沉积速率相对偏低,强超压也可以发育,这是不同于莺歌海盆地由快速埋藏而引起的欠压实型强超压。

膏盐层对欠压实作用机制的超压形成和保存有重要作用,尤其是强超压的分布受到膏盐层的控制。膏盐层的封存作用主要体现在两个方面。

1) 双重封闭机制

膏盐岩对异常高压起到了物性和压力双重封闭作用。盐岩作为盖层,其排替压力是最大的,主要原因是岩性致密,几乎不发育孔喉。同时膏盐岩具有很高的突破压力,这样就可以使强超压保存下来。

2) 对超压的保护作用

膏盐岩具有塑性强、易流动的特点,同时具有极强的韧性。在通常的地质条件下,不同岩性的岩石韧性大小具有如下顺序:盐岩>硬石膏>富含有机质页岩>页岩>粉砂质页岩>钙质页岩>燧石岩^[21]。膏盐层对异常高压的保护作用体现在其具有极强的韧性和流动性,使裂缝得以填充,从

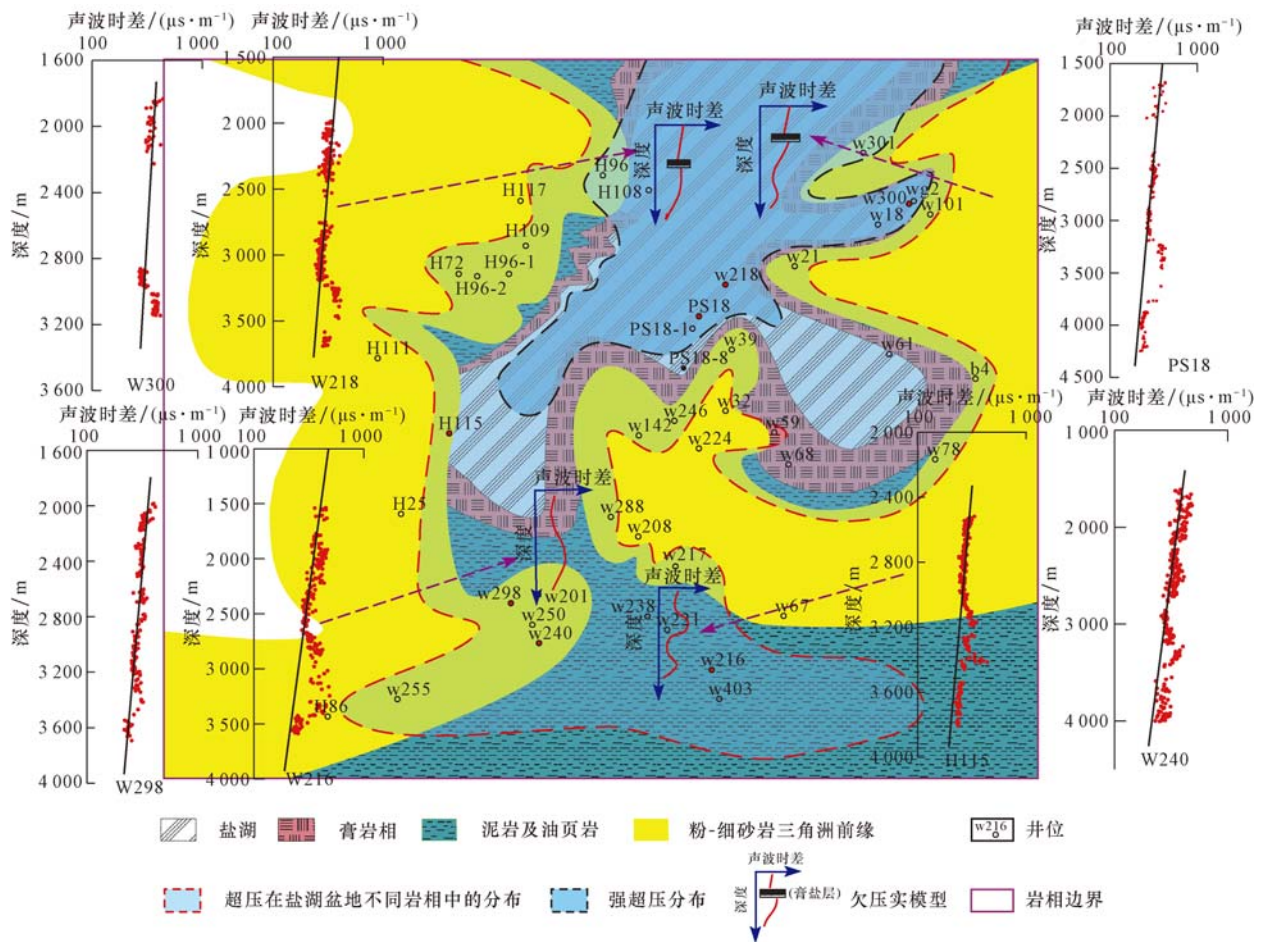


图3 柳屯洼陷沙三上亚段盐膏岩展布模式、不同岩相中的超压分布以及欠压实特征

Fig. 3 Evaporite distribution as well as overpressure and undercompaction characteristics of different lithofacies in the upper 3rd member of the Shahejie Formation in the Liutun sag

而使裂缝消失在膏盐岩盖层中,对下覆泥岩中的超压起到保护作用(图4)。

由上述分析可知,由膏盐层强封闭性导致的欠压实是形成超压的原因之一,但欠压实是不是盐湖区超压的主要成因机制,需要进行定量评价。为此根据现有的资料,基于欠压实理论,采用等效深度法计算欠压实带压力,进而定量评价欠压实对超压的贡献度。等效深度法计算泥岩地层流体压力的原理是:在泥岩压实曲线上,欠压实带内任一点的有效应力与正常压实段上孔隙度相同的点的有效应力相同^[22]。通过用等效深度法确定的欠压实段上的一点与正常压实段上的一点之间的过剩地层压力与总过剩压力(预测压力减去静水压力)的比值来定量评价欠压实对超压的贡献度。欠压实带孔隙流体压力 p 和静水压力 p_H 的计算公式为:



图4 柳屯洼陷 PS18-1 井裂缝在不同岩性中的发育
Fig. 4 Development of fractures in different lithologies in the well PS18-1 of the Liutun sag

$$p = r_{bw}H - \frac{r_w - r_{bw}}{c} \ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad (1)$$

$$p_H = \frac{\rho_w g H}{1\ 000} \quad (2)$$

式中: p ——孔隙流体压力, MPa;

p_H ——静水压力, MPa。

r_{bw} ——地层水密度, $\text{kg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m})$;

H ——地层埋深, m;

r_w ——上覆岩层平均密度, $\text{kg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m})$;

c ——正常压实趋势线方程斜率的绝对值, 无量纲;

Δt_0 ——地表声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$;

Δt ——欠压实带泥岩声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

欠压实引起的地层过剩压力为:

$$P_0 = \frac{\rho g (H - h)}{1\ 000} \quad (3)$$

式中: p_0 ——欠压实引起的地层过剩压力, MPa;

h ——与欠压实带具有相同的声波时差的正常压实带中对应的深度, m;

ρ ——地层平均密度, g/cm^3 。

在文留地区 r_{bw} 取为 $0.11 \text{ kg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m})$ ^[17]; 通过统计地层密度与地层深度的关系, 得出 r_w 计算公式^[17]为:

$$r_w = 0.1743 + 0.000\ 012\ 7H \quad (4)$$

考虑到该盐湖区的地形为斜坡带, 而且盆地模拟表明东营组末期构造抬升, 剥蚀厚度达到

800 m, 在这样的状况下每一口井的压实情况会有一些不同, 故在计算孔隙流体压力时, 分别建立每一口井的压实趋势线, 即每一口井对应一个斜率, 运用上述公式计算结果见表1。

上述建立的等效深度法模型经过 PS18 井实测压力数据的检验, 平均绝对误差为 4.1%, 证实该模型可以用来预测欠压实带压力值。欠压实引起的过剩地层压力占总过剩压力比例在 53.068% ~ 71.416%, 平均为 62.758%。定量研究结果表明在东濮凹陷盐湖盆地欠压实是形成超压的主要成因机制。

2.2 膏盐层对生烃作用和粘土矿物脱水的影响

2.2.1 生烃作用和粘土矿物脱水

沙三上时期, 柳屯洼陷盐湖区是生烃中心之一, 泥质烃源岩有机碳含量分布范围在 0.14% ~ 6.19%, 平均有机碳含量为 2.39%。烃源岩干酪根类型以 II₁ 和 II₂ 型为主, 同时含有部分 I 型, 以生油为主。如图 5, 超压系统基本上在 3 200 m 以下, 根据实测镜质体反射率 R_0 数据可知, 在 3 250 m 附近实测 R_0 突然变为 0.92% 左右, 进入大量生烃期。盐湖区超压顶界面深度与大量生烃深度在空间上具有一致性, 因此生烃作用对超压的形成有一定的贡献。

盐岩的热导率比砂岩、泥岩、碳酸盐岩要高得多, 则盐岩层在深层会降低地温梯度^[21]。来自深层的热源可以通过盐岩层传到上部泥岩地层, 而盐膏层间的夹层泥岩发育旋回频繁, 多层叠加可

表1 柳屯洼陷欠压实引起的过剩地层压力与过剩压力比较

Table 1 Comparison between overpressure caused by undercompaction and common overpressure in the Liutun sag

井号	深度/m	正常压实趋势线斜率绝对值	静水压力/MPa	预测压力/MPa	实测压力/MPa	Δp /MPa	p_0 /MPa	$R/\%$
PS18	3 952.7	0.000 302	39.527	55.280	57.691	15.750	10.378	65.869
PS18	4 077.5	0.000 302	40.775	70.392	67.670	29.617	18.800	63.475
PS18	4 156.6	0.000 302	41.566	75.821	77.740	34.255	18.368	53.630
PS18	4 229.0	0.000 302	42.290	82.459	77.980	40.169	24.596	61.233
W218	3 650.0	0.000 250	36.500	69.191	—	32.691	21.620	66.133
W298	3 416.0	0.000 258	34.160	76.317	—	42.157	22.372	53.068
W300	3 104.0	0.000 200	31.040	69.562	—	38.522	27.511	71.416
WG2	3 050.0	0.000 190	30.500	62.805	—	32.305	22.912	70.924
H96	3 700.0	0.000 273	37.000	64.842	—	27.842	16.450	59.080

注: Δp 为总过剩压力(预测压力-静水压力); p_0 为欠压实引起的过剩地层压力; R 为欠压实引起的过剩地层压力占总过剩压力的比例($p_0/\Delta p$)。

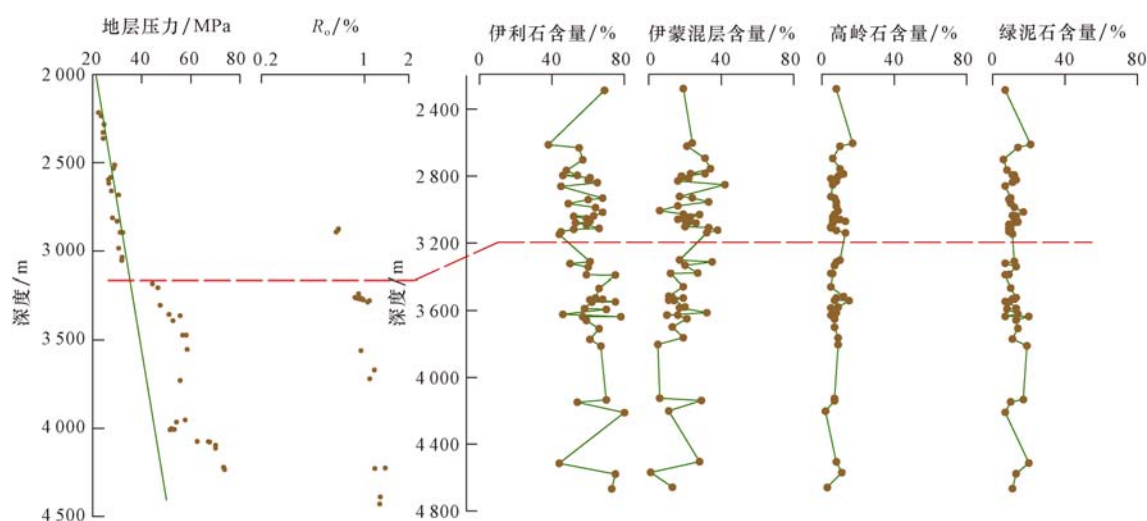


图5 柳屯洼陷地层压力与镜质体反射率(R_o)和粘土矿物含量间的关系

Fig. 5 Relationships among formation pressure, R_o and clay mineral content in the Liutun sag

以形成热流屏障,使得超压泥岩层段热流集中,促使粘土矿物转化。通过对文留地区粘土矿物测试分析可知,其主要成分为伊利石,其次为伊蒙混层(图5)。在超压段内,伊利石含量有增大的趋势,伊蒙混层含量在逐渐降低,这就说明在超压段有蒙脱石大量脱水转化为伊蒙混层,进一步转化为伊利石。蒙脱石向伊利石转化最主要的条件是需要有钾离子的参与和足够高的温度^[23-24]。盐湖区本身就富含钾离子,并且由于盐岩具有极好热传导性,造成局部泥岩地层地温较高,这些因素都有利于粘土矿物脱水增压。如盐湖中心的文古2井地热梯度较低,为28.5℃/km,3750m以下温度达到120~150℃。

PS18-1井强超压顶界面在3210m左右,经过实测数据分析,在超压段内石膏含量基本上为0,最大不超过5%;而硬石膏含量平均含量为14.5%,最大达到62%。从含量的变化趋势上看,石膏大量脱水转化为硬石膏增强欠压实程度,有利于超压发育。

2.2.2 膏盐层对生烃增压的影响

东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地具有高温、超高压的特征。具有良好热导率的盐岩使得泥岩段热流集中,造成泥岩温度偏高,有利于有机质的热演化和粘土矿物脱水;然而,另一方面超压对有机质热演化的影响较为复杂^[25-30],目前从不同盆地超压对有机质热演化的影响来看,抑制作用的实例

占主导。在东濮凹陷超压抑制烃类的热演化,而对镜质体反射率未产生可识别的影响^[10,25];而东濮凹陷部分盐下超压系统内富氢组分的生烃作用及液态烃的裂解作用受到抑制,而贫氢组分的熟演化,包括镜质体的成熟作用未受到可识别的影响^[9]。因此,东濮凹陷盐湖盆地超压会抑制生烃作用,尤其是发育强超压时,抑制能力会更强,但对镜质体反射率的演化却无影响。

烃源岩的大量生气作用被认为是产生超压的重要机制,但生油作用作为超压发育机制的有效性尚存在一定程度的争议^[3-4,14,31-32]。然而,近年来在很多沉积盆地中发现超压带的分布与成熟烃源岩的分布具有非常密切的关系。在西西伯利亚盆地、渤海湾盆地东营凹陷,有关研究者认为超压主要机制是生油作用^[14,33]。柳屯洼陷盐湖区具备烃源岩发育的良好条件,盐岩的封盖使得生成的油气得以很好的保存,这些条件都是生烃增压的有利因素。PS18-1井超压顶界面3200m附近发育强超压,测试分析 R_o 为0.86%~1.08%,根据地化参数分析其为低熟原生稠油。从前人关于生油作用对超压贡献的研究来看,成熟的烃源岩并且是能生成含轻质组分较多的烃源岩与超压带的分布有密切关系,而没有表明生成稠油能成为超压的主要机制之一,因为稠油并不像轻质油那样有明显的体积膨胀效应,更重要的是PS18-1井为强超压,原生稠油所产生的超压达不到这样的强度。实测镜质体反射率相对偏高,这就说明低

熟的原生稠油应该是在 R_0 相对低一些时生成的,随着有机质热演化,生烃作用受到超压的抑制,但 R_0 并未受到抑制。

在生烃作用对超压的贡献度的评价中,催化剂也是一个重要的方面。地层中具有较强催化性能的物质主要是粘土矿物,特别是蒙脱石。虽然伊利石对有机质转化也起催化作用,但是其作用明显不如蒙脱石^[8,34],蒙脱石对于酪根热降解生烃作用的催化能力最强。粘土矿物转化,使得蒙脱石脱水大量被消耗,生成催化能力很弱的伊利石,极大地削弱其催化功能,对生烃作用有不利的影响。因此在盐湖盆地,具有良好热导率的盐岩间接地抑制生烃作用。然而有实验研究表明膏岩等盐类物质对烃源岩热降解生烃过程有明显的催化作用^[35-36],因此盐膏岩本身对生烃作用具有促进作用。

东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地,由于膏盐岩具有良好的热导率,它产生的高温有利于烃源岩热降解,其本身对生烃又有催化作用,但是膏盐层的存在为强超压的保存提供极为有利的条件,而超压和催化剂的消耗都会抑制生烃作用;同时低熟原生稠油的存在,证实生烃作用对超压形成的贡献有限,不可能成为东濮凹陷盐湖盆地超压的主要成因机制,这不同于前人关于中国东部淡水沉积盆地超压主要机制是欠压实和生烃作用的观点,其根本原因为膏盐层的性质。

3 结论

1) 通过对东濮凹陷柳屯洼陷盐湖区超压成因的分析,指出膏盐层的性质是影响和控制超压发育的根本原因,膏盐层的封盖能力使得欠压实型超压得以保存,在沉积速率很低的背景下使欠压实能成为超压成因机制的根本地质要素,也是强超压能够保存的最根本的条件;盐岩具有良好的热导率,使得泥岩地层呈现出高温的特征,从而有利于生烃作用和粘土矿物转化;膏盐层本身能脱去一定量的水,会增强欠压实效应。

2) 前人对东濮凹陷超压成因研究都是定性的描述,作者基于欠压实理论,采用等效深度法,通过欠压实引起的过剩地层压力与总过剩压力的比值来定量评价欠压实作用对超压的贡献,研究结果表明在该盐湖盆地欠压实作用对超压的贡献为 53.068%~71.416%,平均为 62.758%。

3) 东濮凹陷盐湖盆地生烃作用对超压的贡献是有限的,不同于中国东部盆地超压成因主要机制为欠压实和生烃作用,其核心要素为膏盐层。

致谢:在文章撰写中,引用朱芳冰老师的一些实测数据,在这表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 张金功,袁政文. 泥质岩裂缝油气藏的成藏条件及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 336-338.
Zhang Jingong, Yuan Zhengwen. Formation and potential of fractured mudstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 336-338.
- [2] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluids compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1-12.
- [3] Hunt J M, Whelan J K, Eglinton L B, et al. Gas generation—a major cause of deep Gulf Coast overpressure [J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(18): 59-62.
- [4] Luo Xiaorong, Guy Vasseur. Geopressuring mechanism of organic matter cracking: numerical modeling [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80: 856-874.
- [5] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 1023-1041.
- [6] 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): 1-10.
Zhang Qiming, Dong Weiliang. Overpressure system hydrocarbon-bearing basin in China [J]. Acta Petroli Sinica, 2000, 21(6): 1-10.
- [7] 罗晓容. 构造应力超压机制的定量分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1086-1093.
Luo Xiao Rong. Quantitative analysis on overpressuring mechanism resulted from tectonic stress [J]. Chinese Journal Geophys, 2004, 47(6): 1086-1093.
- [8] 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.
Hao Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanism of petroleum accumulation in overpressure Basins [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [9] 曾治平. 东濮凹陷深层超压演化及超压环境下油气成藏机理[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
Zeng Zhiping. Overpressure evolution and mechanism of petroleum accumulation in overpressure environment of Dongpu Depression [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2006.
- [10] Hao Fang, Zou Huayao, Gong Zaisheng, et al. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation: Case studies from petroleum basins in China [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91: 1467-1498.

- [11] 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, Huang Yongling, Feng Youliang. Anomalous overpressure system of early Tertiary in Dongying depression and its petroleum geology significance[J]. Petroleum Exploration and Development,2000,27(4):67-70.
- [12] Xie X, Bethke C M, Li S, et al. Overpressure petroleum generation and accumulation in the Dongying Depression of the Bohaiwan Basin, China[J]. Geofluids, 2001, 1: 257-271.
- [13] 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 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.
- [14] Guo Xiaowen, He Sheng, Liu Keyu, et al. oil generation as the dominant overpressure mechanism in the Cenozoic Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94: 1859-1881.
- [15] 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 Xiaoyun, Gong Jingjing, Yang Shigang, et al. Eocene overpressure analysis in Wenliu area of Dongpu Depression[J]. PGRE, 2007, 14(5): 20-22.
- [16] 吴楠,刘显凤,杨世刚,等. 东濮凹陷白庙地区古近系超压成因机理[J]. 地质科技情报,2007,26(2):65-68.
Wu Nan, Liu Xianfeng, Yang Shigang, et al. Eocene overpressure mechanism in Baimiao area of Dongpu Depression[J]. Geo-logical Science and Technology Information, 2007, 26(2): 65-68.
- [17] 靳广兴. 东濮凹陷北部成藏动力学系统研究[D]. 北京:中国地质大学,2008.
Jin Guangxing. Dynamic system of oil and gas migration and accumulation of the north part of Dongpu depression[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [18] 周兴熙. 塔里木盆地油气系统中、新生界的流体压力结构和油气成藏机制[J]. 地学前缘,2001,8(4):351-360.
Zhou Xingxi. The Mesozoic-Cenozoic fluid pressure structure and reservoir-forming machine process in the QUKA petroleum system in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 351-360.
- [19] 徐士林,吕修祥,杨明慧等. 库车坳陷膏盐岩对异常高压保存的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2004,19(4):5-8.
Xu Shilin, Lv Xiuxiang, Yang Minghui, et al. Controlling effect of gypsum and salt rocks on abnormally high pressure in Kuche Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Nature Science Edition), 2004, 19(4): 5-8.
- [20] 柳广弟,王雅星. 库车坳陷纵向压力结构与异常高压形成机理[J]. 天然气工业,2006,26(9):29-31.
Liu Guangdi, Wang Yaxing. Vertical pressure structure and genetic mechanism of overpressure in Kuqa Depression, the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 29-31.
- [21] 陈发亮. 东濮凹陷盐湖盆地油气成藏规律及预测技术研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
Chen Faliang. Study on hydrocarbon accumulation and prediction technology in dongpu Salt-Basin[D]. Beijing: China Academy of Sciences, 2006.
- [22] 王震亮,张立宽,施立志,等. 塔里木盆地克拉2气田异常高压的成因分析及其定量评价[J]. 地质评论,2005,51(1):55-63.
Wang Zhenliang, Zhang Likuan, Shi Lizhi, et al. Genesis analysis and quantitative evaluation on abnormal high fluid pressure in the kela-2 Gas Field, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2005, 51(1): 55-63.
- [23] Hower J, Eslinger E V, Hower M E, et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1; mineralogical and chemical evidence[J]. GSA Bulletin, 1976, 87: 725-737.
- [24] Boles J R, Franks S G. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1979, 49: 55-70.
- [25] 郝芳,姜建群,邹华耀,等. 超压对有机质热演化的差异抑制作用及层次[J]. 中国科学(D辑),2004,34(5):443-451.
Hao Fang, Jiang Jianqun, Zou Huayao, et al. The overpressure differently and levelly retard the organic evolution[J]. Science in China(D Series), 34(5): 443-451.
- [26] Monthieux M, Landais P, Durand B. Comparison between extracts from natural and artificial maturation series of Mahakam delta coals[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10: 299-311.
- [27] Petzoukha Yu, Seliwnov O. Promotion of petroleum formation by source rock deformation[C]//Organic Geochemistry Advance and Application in the Natural Environment. Manckerster: Manckerster University Press, 1991: 312-314.
- [28] 解启来,范善发,周中毅. 压力对烃源层演化及产烃影响的模拟实验[J]. 矿物岩石地球化学通报,1996,15(2):91-93.
Xie Qilai, Fan Shanfa, Zhou Zhongyi, et al. Influence of pressure on the evolution and hydrocarbon-generation of source bed by simulating experiments[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1996, 15(2): 91-93.
- [29] Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19: 141-159.
- [30] Jiang Feng, Du Jianguo, Wang Wanchun, et al. The study on high-pressure-high-temperature aqueous pyrolysis II[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 12(4): 146-148.
- [31] Swarbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnor-

- mal pressures: An overview [C] // Law B E, Ulmishek G F, Slavin V. Abnormal pressures in hydrocarbon environments. AAPG Memoir, 1998, 70: 13 – 34.
- [32] Swarbrick R E, Osborne M, Yardley G S. Comparison of overpressure magnitude resulting from the main generating mechanisms [C] // Huffman A R, Bowers G L. Pressure Regimes in Sedimentary basins and their Prediction. AAPG Memoir, 2002, 76: 1 – 12.
- [33] Lopatin N V, Emets T P, Romanov E A, et al. Petroleum migration and trapping mechanism in fine-grained source rock formation [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78 – 79 (3): 395 – 397.
- [34] 王兆明, 罗晓容, 陈瑞银, 等. 有机质热演化过程中地层压力的作用与影响 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (1): 39 – 46.
- Wang Zhaoming, Luo Xiaorong, Chen Ruiyin, et al. Effects and influence of pore pressure on organic matter's maturation [J]. Advance in Earth Science, 2006, 21 (1): 39 – 46.
- [35] 赵桂瑜, 刘洛夫, 李术元. 爱沙尼亚干酪根催化降解生烃过程及动力学研究 [J]. 沉积学报, 2004, 22 (3): 525 – 528.
- Zhao Guiyu, Liu Luofu, Li Shuyuan. Study on characteristics and kinetics of catalytic degradation from Estonia kerogen [J]. Acta Sediment Ologica Sinica, 2004, 22 (3): 525 – 528.
- [36] 王娟, 金强, 马国政, 等. 高成熟阶段膏岩等盐类物质在烃源岩热解生烃过程中的催化作用 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20 (1): 26 – 31.
- Wang Juan, Jin Qiang, Ma Guozheng, et al. Catalytic action of sulphate evaporates in pyrolytic gas generation of source rocks [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20 (1): 26 – 31

(编辑 董立)

(上接第685页)

- [36] Cooles P, Mackenzie A S and Quigley T M. Calculation of petroleum masses generated and expelled from source rocks [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10: 235 – 245.
- [37] Mackenzie A S and Quigley T M. Principles of geochemical prospect appraisal [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72 (4): 399 – 413.
- [38] 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移 [M], 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 91 – 92.
- Chen Fajing, Tian Shicheng. Compaction and hydrocarbon migration [M], Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989: 91 – 92.
- [39] 邱楠生, 蔡进功, 李善鹏, 等. 昌潍坳陷潍北凹陷热历史和油气成藏期次 [J]. 地质科学, 2003, 38 (3): 332 – 41.
- Qiu Nansheng, Cai Jingong, Li Shanpeng, et al. Thermal evolution and hydrocarbon entrapment in the Weibei sag, Changwei depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38 (3): 332 – 41.
- [40] 朱光有, 金强, 戴金星, 等. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究 [J], 石油与天然气地质, 2004, 25 (2): 209 – 215.
- Zhu Youguang, Jin Qiang, Dai Jinxing, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying depression [J], Oil & Gas Geology, 2004, 25 (2): 209 – 215.
- [41] 蒋有录, 刘华, 张乐等. 东营凹陷油气成藏期分析 [J], 石油与天然气地质, 2003, 24 (3): 215 – 218.
- Jiang Youlu, Liu Hua, Zhang Le, et al. Analysis of petroleum accumulation phase in Dongying sag [J], Oil & Gas Geology, 2003, 24 (3): 215 – 218.
- [42] 邱楠生, 金之钧, 胡文喧. 东营凹陷油气充注历史的流体包裹体分析 [J]. 石油大学学报, 2000, 24 (4): 95 – 103.
- Qiu Nansheng, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Study on the hydrocarbon charge history in Dongying depression by evidence from fluid inclusions [J]. Journal of the university of petroleum, China, 2000, 24 (4): 95 – 103.
- [43] 祝厚勤, 庞雄奇, 姜振学, 等. 东营凹陷岩性油藏成藏期次与成藏过程 [J]. 地质科技情报, 2007, 26 (1): 65 – 70.
- Zhu Houqin, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. Accumulation time and accumulation process of lithological Reservoirs in Dongying Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26 (1): 65 – 70.
- [44] 李兆奇, 陈红汉, 刘惠民, 等. 流体包裹体多参数综合划分东营凹陷沙三段油气充注期次及充注时期确定 [J]. 地质科技情报, 2008, 27 (4): 69 – 74.
- Li Zhaoqi, Chen Honghan, Liu Huimin, et al. Division of hydrocarbon charges and charging date determination of Sha 3 Member, Dongying Depression by various aspects of fluid inclusions [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27 (4): 69 – 74.
- [45] 孙秀丽, 陈红汉, 宋国奇, 等. 东营凹陷胜坨地区深层油气成藏期及主控因素分析 [J]. 石油学报, 2010, 31 (3): 386 – 393.
- Sun Xiuli, Chen Honghan, Song Guoqi, et al. Hydrocarbon accumulation period and its controlling factors in deep formations of Shengtuo area in Dongying Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (3): 386 – 393.

(编辑 董立)