

# 高邮凹陷北斜坡阜宁组异常压力成因机制研究

吴峰, 钱诗友, 郑元财

(中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组异常高压主要发育在阜宁组二段(阜二段)、阜宁组三段(阜三段)底部和阜宁组一段(阜一段)顶部。综合分析异常高压成因机制得知:生烃作用、黏土矿物脱水是阜二段异常高压的主要成因;流体传导超压是阜三段、阜一段异常高压的成因。在此基础上恢复了研究区阜宁组超压演化过程。

**关键词:** 高邮凹陷 异常高压 阜宁组 成因机制

**中图分类号:** TE122 **文献标志码:** A

## Study on forming mechanism of abnormal high – pressure in Funing Formation in northern slope of Gaoyou Sag

WU Feng, QIAN Shiyu, ZHENG Yuancai

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Abnormal high – pressure in the northern slope of Gaoyou Sag is mainly developed in the second member, the bottom of the third member, and the top of the first member of Funing Formation. By analyzing the forming mechanism of the abnormal high – pressure in Funing Formation, it was concluded that hydrocarbon generation and dehydration of clay minerals were the main causes of abnormal high – pressure in the second member of Funing Formation, and the conduction overpressure of fluid was the cause of abnormal high – pressure in the third member and the first member of Funing Formation. On this basis, it was resumed the overpressure evolution process of Funing Formation in the northern slope.

**Key words:** Gaoyou Sag; abnormal high – pressure; Funing Formation; forming mechanism

苏北盆地高邮凹陷北部斜坡带(简称北斜坡)油气资源丰富。近年来随着勘探逐渐深入,斜坡带和深凹内多口探井在阜宁组钻遇了异常高压。据国内外成熟探区的勘探经验,异常高压与油气藏关系密切,对于油气运移、储层改善、盖层保存、油藏分布等方面均具有一定的控制作用<sup>[1]</sup>。本文以高邮凹陷北斜坡阜宁组地层压力为研究对象,探讨阜宁组异常高压的成因机制,对阜宁组油气成藏动力及富集规律的研究具有重要的意义。

### 1 研究区概况

高邮凹陷为南断北超的箕状凹陷,斜坡带位于凹陷北部。北斜坡被一系列 NE 和近 EW 断层切割而形成众多断鼻或断块,并已发现多个含油构造(图 1)。研究区阜宁组自下而上发育阜一段( $E_1f_1$ )、阜二段( $E_1f_2$ )、阜三段( $E_1f_3$ )和阜四段

( $E_1f_4$ )四套地层:阜一段为三角洲前缘亚相沉积,顶部为灰色泥岩与粉砂岩互层,中下部为棕色泥岩与灰色粉砂岩互层;阜二段为半深湖 – 深湖亚相沉积,岩性为深灰 – 黑色泥岩、泥灰岩;阜三段为三角洲前缘亚相沉积,岩性为灰色泥岩与粉砂岩互层;阜四段为大套半深湖 – 深湖亚相的深灰色泥岩、泥灰岩。阜三段和阜一段发育三角洲沉积的砂泥互层,为主要富油层系,阜四段和阜二段为湖相泥岩沉积。

### 2 地层压力特征

不同学者曾对超压分类提出了多种方案<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期:2019-05-21;改回日期:2019-07-10。

第一作者简介:吴峰(1985—),工程师,从事石油天然气地质研究工作。E-mail: wufeng.jsyt@sinopec.com。

基金项目:中石化江苏油田分公司项目《高邮凹陷北斜坡评价勘探提高效益关键技术研究》(JS18002)。

结合本区实际地层压力特征,笔者采用压力系数为0.9和1.2作为界限值,将地层压力划分为低压(压力系数小于0.9)、常压(压力系数为0.9~1.2)和超压(压力系数大于1.2)3种基本类型。

统计实测地层压力数据结果:平面上,阜宁组异常高压主要分布在北斜坡内坡以及深凹带;纵向上,异常高压主要发育在阜二段泥岩、阜三段底部砂岩储集层和阜一段顶部砂岩储层中。

研究区不同层系实测压力数据与深度的关系图可以看出(图2):阜宁组地层压力以常压为主,压力系数为0.9~1.2。从深度约2300 m开始,仅有少数异常高压发育且幅度较小。相比于我国东部其他断陷盆地发育的异常高压,研究区阜宁组现今异常高压值不是十分典型,发育幅度和范围较小。

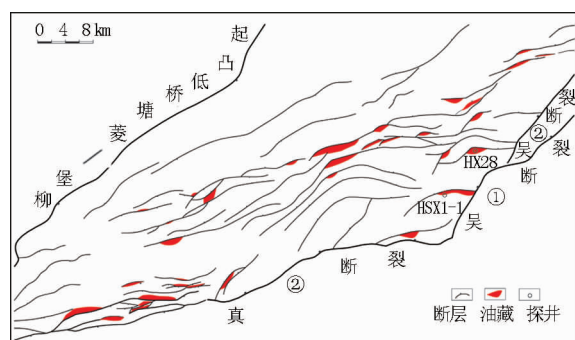


图1 高邮凹陷北斜坡构造纲要( $E_1f_2$  地震反射界面即  $T_3^{(3)}$ )

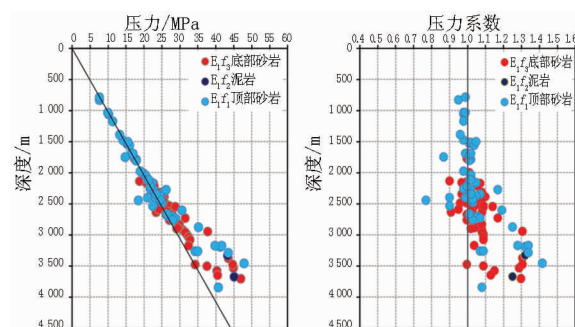


图2 高邮凹陷阜宁组各层系实测压力数据与深度的关系

### 3 异常高压成因机制

高邮北斜坡阜宁组各亚段砂泥特征明显,其中阜二段、阜四段为泥岩发育层段,而阜一段、阜三段为砂岩储层发育层段。基于现今实测压力特征以及解习农(2006)自源型和他源型异常高压的认识<sup>[4]</sup>,本文针对泥岩和砂岩分别研究异常高压的成因机制。

#### 3.1 泥岩异常压力成因机制

前人研究表明不均衡压实、生烃作用、黏土矿物脱水是泥质岩层超压的主要成因<sup>[3-4]</sup>。本文从各种

成因作用的地质条件入手,结合实测数据共同分析。实测压力数据显示异常压力主要分布在阜二段,因此以阜二段为主要研究对象。

##### 3.1.1 不均衡压实

正常压实作用过程中,压实与流体排出达到平衡,孔隙流体压力保持静水压力;但在快速沉积过程中,流体的排出速度无法平衡孔隙容积的减少,滞留流体将承担部分负荷压力,从而流体压力高于静水压力形成超压。郝芳等(2005)指出:欠压实引起的超压主要发育于沉降/沉积速率较高、充填岩性较细的新生代沉积盆地<sup>[3]</sup>。

解习农(2006)构建了简化地质模型,通过改变沉积速率分析异常压力的变化,最终建立沉积速率与超压幅度关系图版(图3)<sup>[4-5]</sup>。高邮凹陷北斜坡阜二段沉积速率为250 m/Ma左右,阜四段沉积速率为330 m/Ma左右。依据图版得出:阜二段、阜四段地层压力系数在1.00~1.15之间。然而,阜二段、阜四段实测地层压力系数范围为0.98~1.42,异常高压地层的压力系数为1.2~1.42。因此,不均衡压实作用并不是阜二段、阜四段异常高压的主要成因。

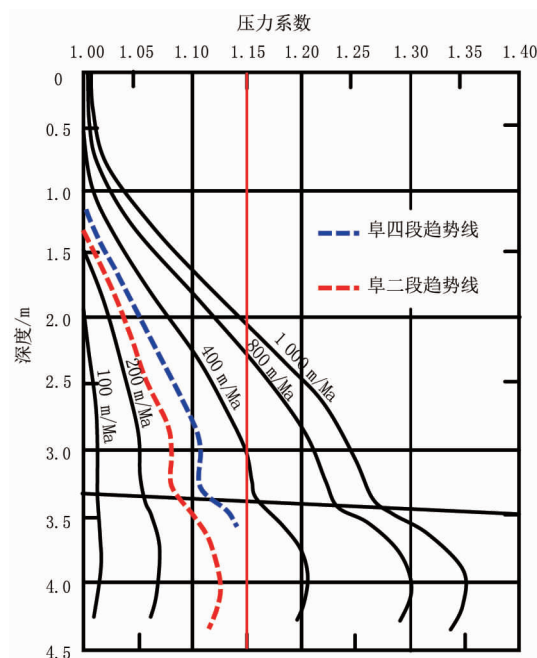


图3 沉积速率与超压幅度关系

Hunt 等对美国湾岸(Gulf Coast)20口钻井的泥页岩密度、孔隙度资料进行了统计分析,发现在两段式线性压实状态下,不均衡压实形成的超压段泥岩密度明显低于正常压实泥岩的密度,泥岩孔隙度则明显较高(图4a)<sup>[6]</sup>。

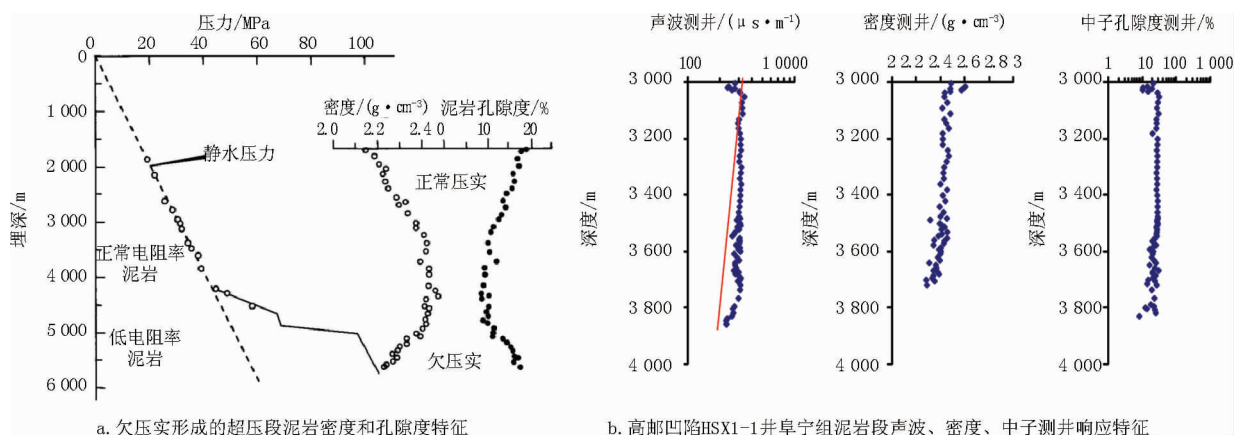


图4 高邮凹陷 HSX1-1 井阜宁组异常高压泥岩段密度和孔隙度特征对比

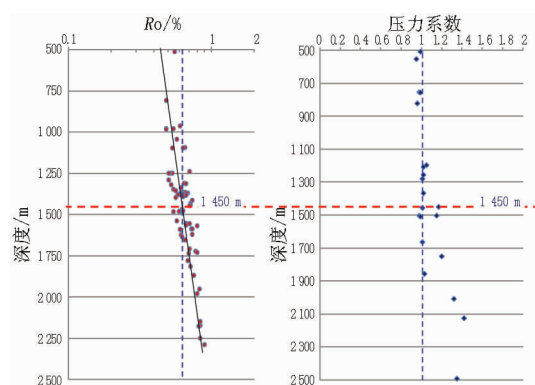
对比研究区 HSX1-1 井的实测压力数据、密度及中子测井响应,发现阜宁组泥岩异常高压段无明显的密度降低和孔隙度增大特征(图 4b)。因此,欠压实作用非研究区超压成因。

### 3.1.2 生烃作用

近年来许多学者发现,超压的分布与成熟源岩的分布密切相关。干酪根生烃过程实际上是一个有机质总体积增加的过程。Hunt 等(1994)发现,一些压实程度非常高的泥岩段地层发育较强超压,认为生烃作用是超压发育的主要机理<sup>[6]</sup>。北斜坡阜二段、阜四段也是烃源岩发育层段,本文运用地层压力、烃源岩  $R_o$ 、密度测井等多种数据,分析超压与生烃作用的关系。

高邮凹陷北斜坡盐城组( $N_y$ )沉积前的古埋深大于现今埋深,因此扣除盐城组和第四系地层厚度,拟合阜二段烃源岩  $R_o$ 、压力系数与深度关系(图 5)。烃源岩成熟门限  $R_o$  为 0.65,对应门限深度为 1 450 m(去掉盐城组和第四系地层的厚度)。当

深度大于 1 450 m 时,压力也开始出现异常。因此,推断异常压力与生烃作用密切相关。

图5 高邮凹陷阜二段烃源岩  $R_o$  -

深度、压力系数 - 深度关系(去  $N_y + Q$  地层厚度)

以 HX28 井为例,阜宁组泥岩异常高压带中无明显的密度降低和孔隙度增大特征,与 Hunt 等建立的生烃超压图版特征相似(图 6)。进一步证实异常压力与生烃作用相关。

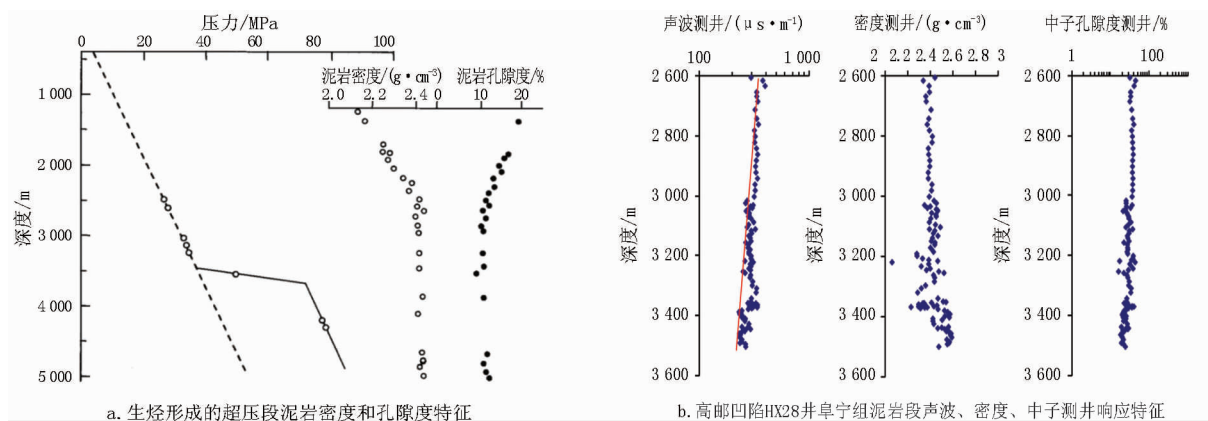


图6 高邮凹陷 HX28 井阜宁组异常高压泥岩段密度和孔隙度特征对比

### 3.1.3 黏土矿物脱水

黏土矿物中含有大量的蒙脱石,当温度达到门

限时,蒙脱石将脱水而转化为伊利石。如果这种排水在一个封闭的体系内,将形成异常高压。但 Ma-

gara(1993)认为黏土的脱水作用对沉积物中原始烃类的再分布起很大作用,但不一定是产生异常孔隙压力的一种主要力量<sup>[7]</sup>。从异常压力的多种成因综合来看,黏土矿物脱水作用对异常高压的形成可能主要起辅助作用。

蒙脱石向伊利石转化的温度一般在 80 ~ 120 °C,与烃源岩成熟的地层温度基本相当。烃源岩达到成熟门限时对应黏土矿物中蒙脱石向伊利石迅速转化,同样与阜二段出现超压的深度界限一致(图 7)。因此推断,黏土矿物脱水作用与超压有一定关系。

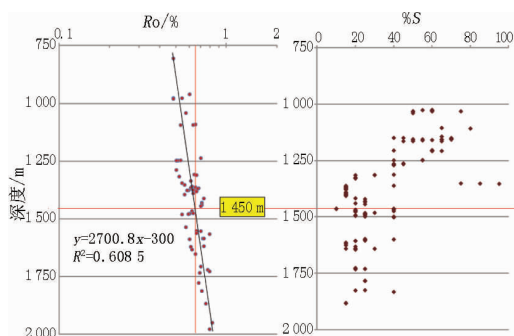


图 7 高邮凹陷阜二段烃源岩  $R_o$  - 深度、%S - 深度关系(去  $N_1 + Q$ )

综上所述,生烃作用、黏土矿物脱水作用是高邮北斜坡阜二段、阜四段异常压力的主要成因,其中黏土矿物脱水起辅助作用。

### 3.2 砂岩异常压力成因机制

高邮凹陷北斜坡阜三段、阜一段发育砂岩储层,是油气富集的有利层系。解习农(2006)指出渗透性较好的储层中超压基本属于它源型超压作用。它源型超压作用主要包括构造挤压应力、流体传导超压等机制。构造挤压应力超过岩石静岩压力的侧向应力值时,岩石侧向受到挤压导致孔隙度降低。当孔隙空间处于封闭条件时,由于流体无法排除或排出受阻而形成异常高压。这种机理引起的异常高压主要出现于构造挤压的地质环境中,而苏北盆地属于拉张型裂谷盆地,不存在大规模的构造挤压作用<sup>[8]</sup>。然而,流体传导超压在中国东部松辽盆地、渤海湾盆地均是可见的,它是最常见于渗透性较好的地层和储层中。因此,流体传导超压是高邮凹陷阜三段、阜一段砂岩储层超压的主要成因。

高邮北斜坡阜二段位于阜一段和阜三段中间,阜二段形成的超压可以流体传导在阜一段和阜三段中形成超压。流体超压传导是通过烃源岩生产油气的运移实现的,因此推断流体超压传导存在两种模

式:一是阜二段超压层产生的高压流体(油气)直接注入紧邻的砂岩储层中,导致砂岩孔隙流体压力增大(图 8a);二是阜二段超压层产生的高压流体通过断裂输导,注入断裂两侧的砂岩储层中形成超压(图 8b)<sup>[9]</sup>。

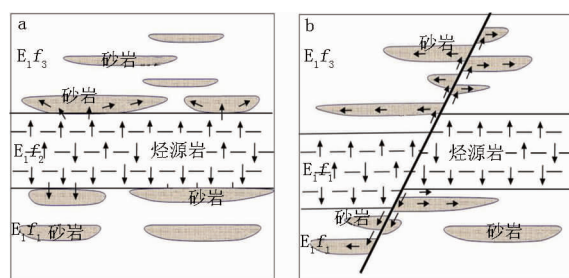


图 8 高邮北斜坡流体超压传导模式

## 4 阜宁组异常高压的演化过程

综上所述,生烃作用、黏土矿物脱水是泥岩层异常压力的成因,流体传导超压是砂岩储层异常压力的成因。结合本区构造演化的特征<sup>[10]</sup>,明确了北斜坡阜宁组超压演化过程:主要包括常压、生烃增压、构造抬升增压、再次埋藏生烃等多个演化阶段。高邮凹陷阜宁组早在戴南组沉积时期前已发育异常高压,且其幅度大于现今,异常高压形成后经历了快速降压和缓慢回升过程(图 9)。

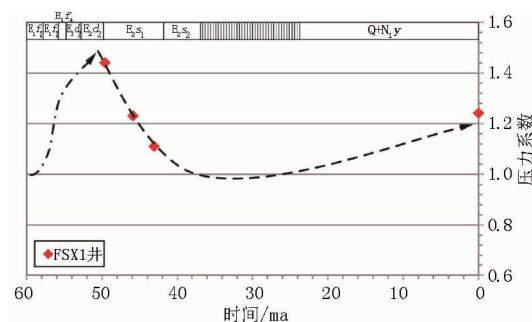


图 9 高邮凹陷北斜坡阜二段地层压力随时间演化

①早期增压过程:戴南组沉积末期阜二段烃源岩逐渐成熟,至三垛组沉积末期埋深达到最大,斜坡带烃源岩大面积生烃,生烃增压的强度也达到最大。此时,高邮凹陷深凹和斜坡大面积发育异常高压,生烃增压的同时伴随着烃类流体的传导,在阜一段、阜三段砂岩储层中也会形成异常高压。

②快速降压过程:三垛运动时期,断裂活动加强,伴随着构造抬升,造成早期异常高压的快速释放,超压快速减弱,阜宁组地层压力大面积恢复到常压。(下转至第 76 页)



$2.58 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。分析原因主要是调驱实施过程中对注入参数进行及时调整,注入泡沫及段塞用量达到并超过方案设计,同时增补稳定剂确保了整体方案的效果。

#### 参考文献:

- [1] 李宾飞. 氮气泡沫调驱技术及其适应性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- [2] 张彦庆, 刘宇, 钱昱. 泡沫复合驱注入方式、段塞优化及矿场试验研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(1): 46-48.
- [3] 王玉斗, 李茂辉, 温科扬, 等. 泡沫渗流机理及渗流模型研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 104-107.
- [4] 李晓南, 程诗胜, 王康月, 等. 中低渗油藏 C2 断块阜一段中高含水期调驱技术研究[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(3): 53-56.
- [5] 苏毅, 赵德喜, 刘宁, 等. 双高油田复合调驱技术研究及应用[J]. 复杂油气藏, 2018, 11(2): 79-83.
- [6] 周东, 冯海全, 李明, 等. 国内外泡沫驱提高采收率技术发展现状[J]. 内蒙古石油化工, 2009, (17): 56-57.
- [7] 李雪松, 王军志, 王曦. 多孔介质中泡沫驱油微观机理研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5): 109-113.
- [8] 陈治中. 海上油田聚合物微球深部调驱技术应用研究[D].

北京: 中国石油大学, 2010.

- [9] 张勇. 海上 Q 油田聚合物微球在线深部调剖技术研究与应用[J]. 石油化工应用, 2016, 35(8): 19-24.
- [10] 赵长久, 么世椿, 鹿守亮, 等. 泡沫复合驱研究[J]. 油田化学, 2004, 21(4): 357-360.
- [11] 李和全, 郎兆新, 胡靖邦, 等. 泡沫复合驱数学模型[J]. 大庆石油学院学报, 1997, 21(3): 20-24.
- [12] 付光勇, 李辉, 陈怀满, 等. 沈 67 块聚合物微球调驱技术可行性研究[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(3): 80-83.
- [13] 程诗胜, 李晓楠, 秦鹏飞, 等. F1 断块 E1F23 聚合物微球调驱先导试验研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(3): 64-68.
- [14] 彭星强, 沈德煌, 徐绍诚, 等. 氮气泡沫调驱提高稠油采收率实验——以秦皇岛 32-6 油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 59-61, 65.
- [15] 彭星强, 王晓春, 罗富平, 等. QHD32-6 油田氮气泡沫调驱数值模拟研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 71-74.
- [16] 李文静, 林吉生, 徐国瑞, 等. 绥中 36-1 油田氮气泡沫逐级调驱实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 177-180.

(编辑 韩 枫)

(上接第 26 页)

③晚期回升过程: 抬升剥蚀过后, 晚期接受盐城组沉积, 地层压力缓慢回升。当埋深大于古埋深时, 黏土矿物脱水以及烃源岩再次生烃形成异常压力, 并再次随着烃类流体的传导在阜一段、阜三段砂岩储层形成异常压力。新形成的异常高压远小于地质历史时期的异常高压幅度。

## 5 结论

(1) 高邮凹陷北斜坡阜宁组地层压力以常压为主, 仅有局部地区现今存在异常高压且幅度较小。异常高压主要发育在阜二段泥岩、阜三段底部砂岩储集层和阜一段顶部砂岩储层中。

(2) 生烃作用、黏土矿物脱水作用是高邮凹陷阜二段异常压力的主要成因, 其中黏土矿物脱水起辅助作用。流体传导超压是阜三段、阜一段砂岩储层超压的主要成因。

(3) 高邮北斜坡阜宁组异常高压的演化经历了早期增压、快速降压和晚期回升 3 个过程。

#### 参考文献:

- [1] 陈中红, 查明. 东营凹陷超压流体封存箱与油气聚集[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 607-615.

- [2] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 240-244.
- [3] 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: 19-27.
- [4] 刘晓峰, 解习农. 东营凹陷流体动力系统研究[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 55-59.
- [5] 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.
- [6] HUNT J M, WHELAN J K, EGLINTON L B, et al. Gas generation——A major cause of deep Gulf Coast over-pressures[J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(July 18): 59-62.
- [7] MAGARA K. Pressure sealing: An important agent for hydrocarbon entrapment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1993, 9(1): 67-80.
- [8] 向才富, 冯志强. 松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 90-94.
- [9] 钱诗友, 郑元财, 吴峰, 等. 高邮凹陷北斜坡阜宁组异常高压发育特征[J]. 复杂油气藏, 2012, 11(2): 12-16.
- [10] 能源, 杨桥. 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世—新生代构造沉降史分析与构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(2): 25-32.

(编辑 杨芝文)