

文章编号: 0253-9985(2009)03-0287-07

渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段膏盐层及 地层压力分布特征

刘 晖^{1,2}, 操应长³, 姜在兴², 王升兰⁴, 王艳忠³, 徐 磊⁵

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源 国家重点实验室, 北京 100083 2 中国地质大学 能源学院, 北京 100083;
3 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061 4 中国海洋石油股份有限公司 北京研究中心
勘探事业部, 北京 100027; 5 中国石油天然气股份有限公司 大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组四段垂向上发育 3 套膏盐岩, 膏盐韵律层具有明显的蒸发成因的沉积序列。膏岩层在平面上呈环状分布, 从湖盆中心向盆地边缘依次沉积盐岩-石膏-泥膏岩-碳酸盐岩-泥灰岩-碎屑岩。在声波时差计算地层压力系数和实测压力统计的基础上研究发现, 古近系地层压力在垂向上表现为浅层正常压力系统和深层超压系统的“双层结构”。平面上, 异常压力的分布范围与膏盐岩的分布具有较好的对应关系。膏盐岩地层的压力封闭和物性封闭的双重封闭机制是东营凹陷沙河街组四段地层超压形成的重要控制因素之一。

关键词: 地层压力; 分布特征; 膏盐岩; 沙河街组四段; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Distribution characteristics of evaporates and formation pressure of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin

Liu Hui^{1,2}, Cao Yingchang³, Jiang Zaixing², Wang Shenglan⁴, Wang Yanzhong³, Xu Lei⁵

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2 School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 College of Earth Resources and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China; 4 CNOC Petroleum Research Center, Beijing 100027, China; 5 PetroChina Daqing Oilfield Limited Company, Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract Three sets of gypsolyte-salt rocks occur vertically in Es⁴ (the fourth member of the Shahejie Formation) of the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin. The gypsolyte-salt rhythmic units show apparent depositional sequence of evaporation in genesis. On plane view, the gypsolyte-salt rocks are in ring-like distribution, and salt rock, gypsolyte, argillaceous gypsolyte, carbonate, marl and clastic rock occur successively from the center to the border of the basin. Studies based on formation pressure coefficient calculation through interval transit times and statistics of the measured pressures show that the Paleogene presents vertically a “double layer structure” with normal pressure at the upper part and abnormal high pressure at the lower part. On plane view, the distribution of the abnormal pressure matches well with that of the gypsolyte-salt rocks. It is suggested that the gypsolyte-salt double seal mechanism of pressure seal and physical property seal is one of the key elements controlling the formation of the abnormal pressure in Es⁴ in Dongying depression.

Key words formation pressure; distribution characteristics; gypsolyte-salt; 4th member of the Shahejie Formation; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

收稿日期: 2008-07-15

第一作者简介: 刘晖 (1981-), 男, 博士研究生, 沉积学与层序地层学。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET); 国家“十五”科技攻关项目 (2003BA613A-02)。

东营凹陷属于渤海湾盆地济阳坳陷中的一个次级构造单元,其周围为凸起环绕,北部为陈家庄凸起,西部为青城凸起和滨县凸起,南部为广饶凸起及鲁西隆起。古近纪东营凹陷是一个典型的箕状盆地,北陡南缓,包括北部陡坡带、牛庄洼陷、利津洼陷、博兴洼陷、民丰洼陷及南部缓坡带等二级构造单元^[1,2](图 1)。

近几年,东营凹陷深层勘探取得了重大突破,坨 764 丰深 1 和永 559 等井发现了工业油气流,其中丰深 1 井在沙河街组四段膏盐层之下发现了凝析气藏,且该气藏的气源来自同一时期位于膏盐层之下的沙河街组四段下亚段烃源岩^[3],这预示着东营凹陷深层油气勘探具有较大的潜

力。而东营凹陷古近系沙河街组四段发育厚层膏盐岩,地层普遍存在超压现象,膏盐岩的发育及超压的存在对于烃源岩的发育、油气运聚成藏等具有重要的影响^[4-9],同时超压对碎屑岩储层具有良好的保护和改善作用^[10]。因此,研究东营凹陷沙河街组四段膏盐岩及地层压力分布特征对于该区深层烃源岩及储层评价具有重要的先导意义。

1 膏盐层发育特征

东营凹陷沙河街组四段膏盐岩类型多样,主要有盐岩、膏岩、含膏盐岩、石膏质泥岩、盐质泥岩等。其中沙河街组四段上亚段膏盐岩分布范围较小,岩性不纯,以含膏盐岩、石膏质泥岩、盐质泥岩为主,沙河街组四段下亚段膏盐岩分布范围广泛^[11],岩性较纯,以膏岩、盐岩、膏盐岩为主。根据岩心、录井、地震等资料沙河街组四段下亚段膏盐岩又可以划分两套(图 2)。

1.1 膏盐岩沉积环境

东营凹陷沙河街组四段沉积时期,湖盆水体盐度相对较高,并且从沙河街组四段下亚段到沙河街组四段上亚段,盐度逐渐降低。沙河街组四段下亚段第二套膏盐岩在盆地的大部分地区表现为浅水沉积,岩性上以暗紫色、紫红色细碎屑岩与膏质泥岩、泥膏岩、石膏及盐岩的互层为主,只在盐湖水体最深处、比较小范围内沉积一些膏盐岩

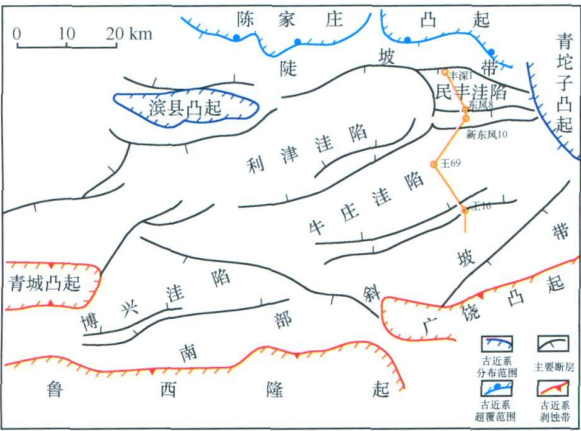


图 1 东营凹陷古近系构造纲要

Fig 1 The Paleogene structure outline map of the Dongying Sag

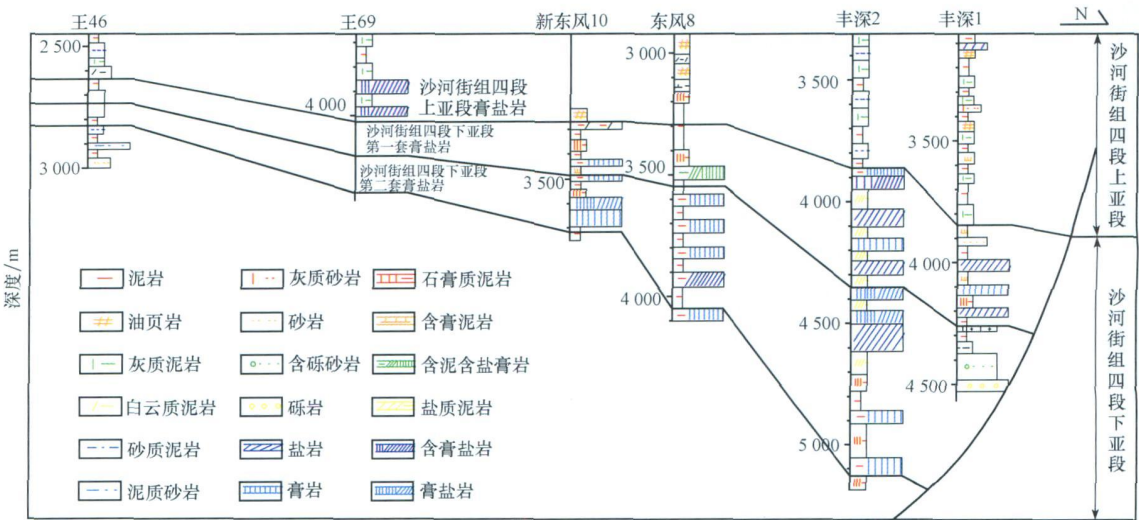


图 2 东营凹陷古近系沙河街组四段膏盐岩 NS剖面对比模式图

Fig 2 Comparison mode chart for gypsolyte-salt rocks NS section of the Es⁴ of Palaeogene the Dongying Sag

与灰色、灰绿色、红色泥岩的互层, 主要为间歇性盐湖和洪积相沉积^[3]; 沙河街组四段下亚段第一套及沙河街组四段上亚段膏盐岩则主要表现深水沉积的一些特征, 膏盐岩一般与暗色泥页岩和油页岩共生, 其间夹有具水平层理的泥岩、泥膏岩或页岩夹层, 基本不发育红色地层, 深灰色含盐泥岩表面可见石盐晶体印模, 在某些层段可以见到指示还原环境的黄铁矿等, 总体上属于盐-咸水湖沉积。

1.2 膏盐岩沉积序列

在垂向序列上每一套膏盐岩都由几十个小的盐韵律层组成, 其岩性主要是石膏、盐岩、膏质泥岩及泥膏岩, 垂向上有比较明显的蒸发成因的沉积序列^[12] (图 3)。每一典型旋回包含 3 个部分。旋回底部为泥岩或薄层碳酸盐岩, 之上为膏质泥岩、泥膏岩、泥质膏盐岩、膏岩或杂卤石, 最上部为膏盐岩及盐岩, 盐岩单层最大厚度可达 21 m (丰深 2 井 5 243.5~5 264.5 m)。在部分井段只发育旋回的前两个部分, 例如东风 1 井主要旋回为泥岩-石膏、杂卤石或钙芒硝。

1.3 膏盐岩的平面分布特征

东营凹陷沙河街组四段膏盐岩平面分布广

泛, 民丰洼陷、中央隆起带、牛庄洼陷及滨南-利津地区都有膏盐岩发育, 具有环状分布特征, 从湖盆中心向盆地边缘依次沉积盐岩-石膏-泥膏岩-碳酸盐岩-泥灰岩-碎屑岩 (图 2 图 4), 但不同时期膏盐岩的沉积中心及沉积厚度随着盐湖的演化有所变化 (图 4)。

沙河街组四段下亚段第二套膏盐岩沉积时期, 膏盐岩沉积中心位于民丰洼陷的丰深 2 井附近, 主要是盐岩、膏盐岩、石膏、泥膏岩及泥盐岩组成的韵律层。盐岩沉积范围较小, 主要集中在民丰洼陷以及中央隆起带附近, 向北突变为砂砾岩, 向盆地缓坡方向渐变为砂泥岩。

沙河街组四段下亚段第一套膏盐岩沉积时期, 盐类沉积中心开始向南迁移, 但迁移规模较小, 仍然以民丰洼陷及中央隆起带为中心。盐岩及石膏沉积范围迅速扩大, 膏质泥岩分布遍全区, 盐湖发育处于鼎盛期。

沙河街组四段上亚段沉积时期, 盐类沉积中心南迁明显, 开始以牛庄洼陷为沉积中心, 盐类沉积范围缩小, 分布局限, 厚度明显减薄。盐岩仅在牛庄洼陷发育, 先期的沉积中心民丰地区及中央隆起带以发育膏岩、泥膏岩为主, 碳酸盐岩类沉积范围增大, 厚度增加。该时期湖平面迅速上升, 开始由盐湖向咸水湖转化。

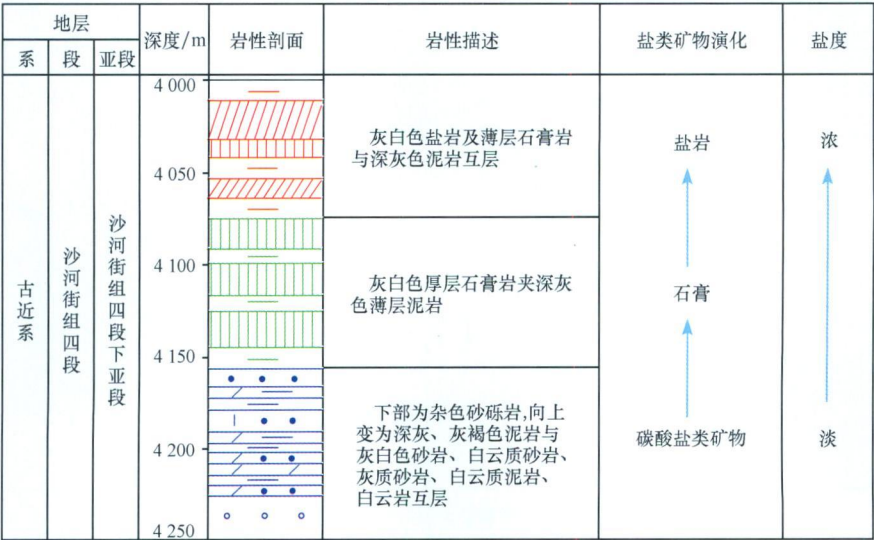


图 3 东营凹陷古近系沙河街组四段膏盐岩沉积序列

Fig 3 Depositional sequence of the gypsolite-salt rocks in the Es⁴ of Palaeogene the Dongying Sag
(以东风 2 井沙河街组四段下亚段第二套膏盐岩为例)

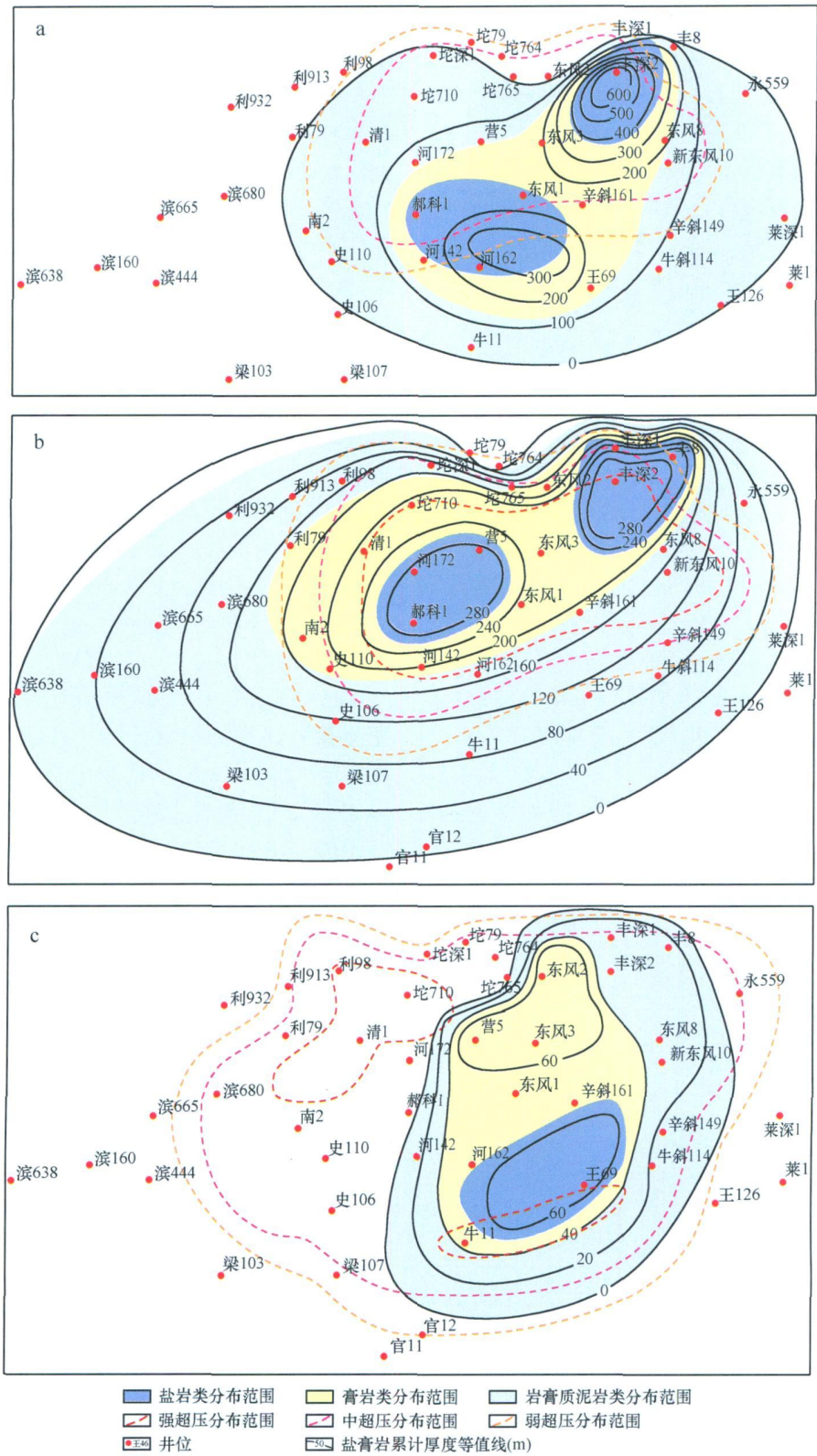


图 4 东营凹陷古近系沙河街组四段膏盐岩与地层压力平面分布特征

Fig 4 Plane distribution of gypsolyte-salt rocks and formation pressure at the Es⁴ of Paleogene in the Dongying Sag

a 东营凹陷沙河街组四段下亚段第二套膏盐岩; b 东营凹陷沙河街组四段下亚段第一套膏盐岩;
c 东营凹陷沙河街组四段上亚段膏盐岩

2 地层压力分布特征

东营凹陷洼陷带 2 200 m 以下地层普遍存在超压,其中沙河街组四段为区域性超压^[13]。根据压力系数可将地层压力划分为超低压(压力系数小于 0.75)、低压(压力系数 0.75~0.90)、常压(压力系数 0.90~1.10)、弱超压(压力系数 1.10~1.20)、中超压(压力系数 1.20~1.50)、强超压(压力系数大于 1.50)^[5]。据此,在声波时差计算地层压力系数和实测压力统计的基础上,系统总结了东营凹陷古近系沙河街组四段地层压力特征。

2.1 垂向发育特征

东营凹陷古近系沙河街组四段实测压力系数与深度的关系表明:东营凹陷地层压力在垂向上表现为“双层结构”(图 5),埋藏深度小于 3 000 m 时,地层压力为正常压力,压力系数为 0.90~1.10 地层层位基本上对应于沙河街组三段中亚段及其以上地层,为浅层正常压力系统;当埋藏深度大于 3 000 m 时,地层压力为中超压或强超压,压力系数一般为 1.20~1.80 基本上对应于沙河街组三段下亚段及其以下地层,为深层超压系统,沙河街组四段上亚段顶部油页岩段和沙河街组四段下压段顶部盐膏岩段分别为强超压,向下压力

逐渐减弱为中超压或弱超压。对于深层超压系统,开始出现弱超压的层位和深度上存在差异。胜坨地区和滨南地区自沙河街组三段上亚段开始出现弱超压,牛庄洼陷、民丰洼陷、中央隆起带沙河街组三段中亚段开始出现弱超压,民丰洼陷北坡沙河街组三段下亚段开始出现弱超压带。滨南地区—胜坨地区—民丰洼陷—中央隆起带—牛庄洼陷弱超压开始出现的深度依次增大,分别为 2 000~2 500, 2 400~2 600, 2 600~2 650, 2 500~2 850, 3 000~3 050 m。

在沙河街组四段超压系统内部,由于所处的构造位置及沉积环境不同,不同地区也表现为不同的压力结构,根据沙河街组四段内部地层压力变化特征可以分为简单超压系统和复合超压系统。简单超压系统是指整个沙河街组四段内部地层压力均为超压,且以中强超压为主,例如新东风 10 井、东风 8 井和坨 764 井;复合超压系统是指沙河街组四段内部地层压力表现为中超压、弱超压及正常压力的无规律变化,这类压力结构主要出现在盆地边缘,由断层幕式活动卸压造成的,例如丰深 1 井和坨深 1 井(图 6)。

2.2 平面分布特征

根据实测地层压力、声波时差计算压力系数等资料,东营凹陷古近系沙河街组四段地层压力在平面上呈环带状分布,由沉积中心向盆地边缘压力逐渐降低,总体表现为北高南低的特征,并且膏盐岩的分布的范围内均有异常压力存在(图 4)。沙河街组四段下亚段沉积时期,第二套膏盐岩地层层段,新东风 10 东风 8 井附近为中超压带,郝科 1 井附近为弱—中超压带,民丰北带丰 8 井附近为正常压力带,坨深 1 井附近为中—弱超压带;第一套膏盐岩地层层段,中央隆起带、民丰洼陷的深洼区以及利津洼陷的盐膏层地层压力为强超压、压力系数大于 1.5 其中在新东风 10 和郝科 1 井可以达到 2.0 以上;在民丰洼陷的北坡丰深 1、丰 8 井附近以及胜坨地区的坨深 1 井附近为中超压,压力系数为 1.2~1.5。沙河街组四段上亚段沉积时期,地层压力呈环带状分布,利津洼陷、胜坨地区的西段、牛庄洼陷的深洼区为强超压区;民丰洼陷、胜坨地区东段、中央隆起带以及牛庄洼陷的边缘为中超压带;南坡、北带断层上升盘、滨南凸起以及莱深 1 井以东为正常压力带。

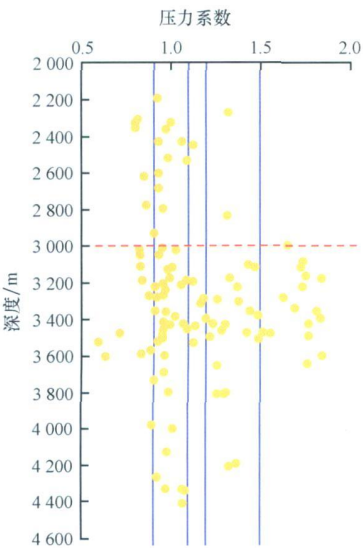


图 5 古近系实测地层压力与深度关系
Fig 5 Measured formation pressure vs depth for the Paleogene

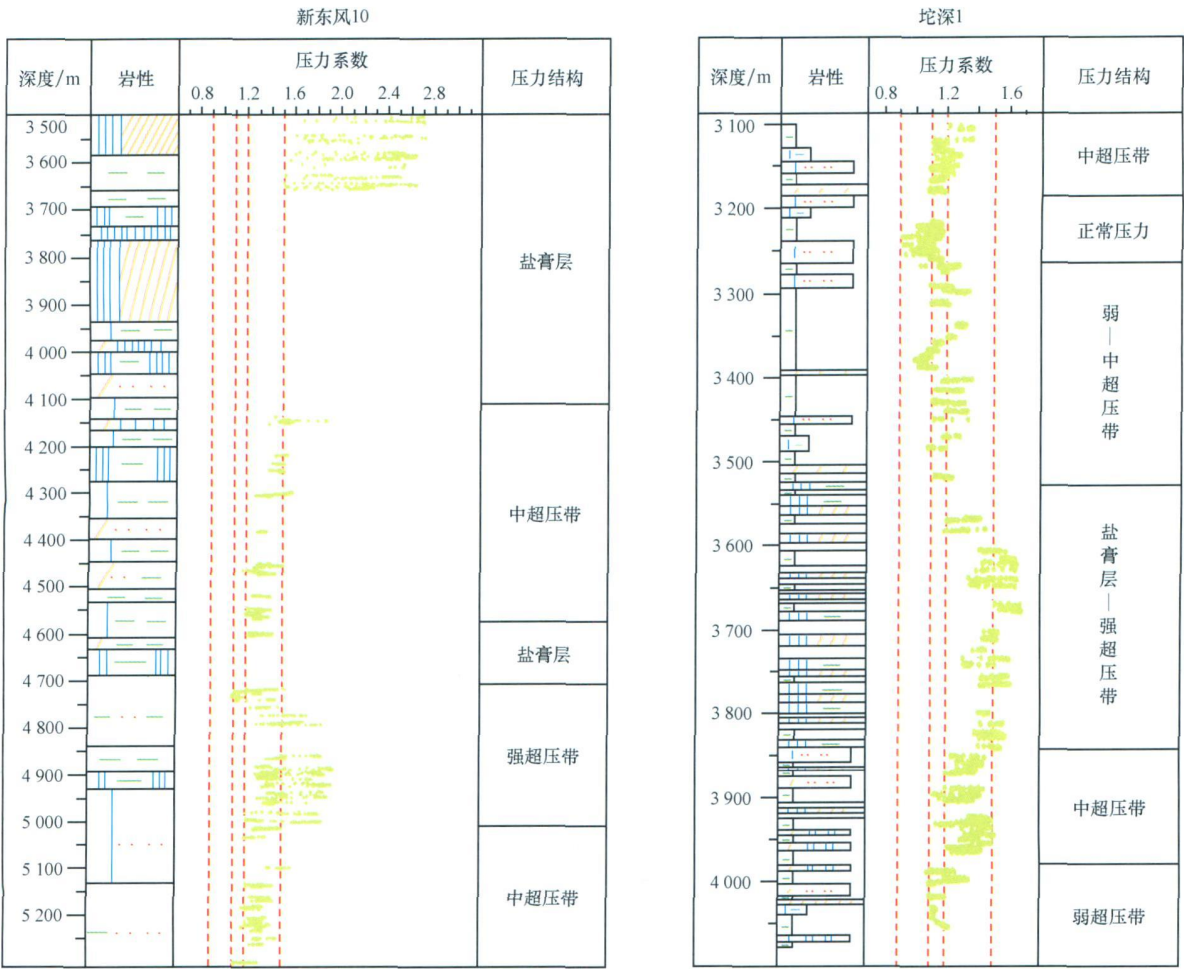


图 6 东营凹陷古近系膏盐层与地层压力关系

Fig. 6 Gypsolyte-salt rocks vs formation pressure of the Es⁴ of Palaeogene the Dongying Sag

3 膏盐岩地层与地层压力的耦合关系

大量研究表明,在膏盐层内部以及其下部地层中常形成异常压力带,李熙哲等研究发现,渤海湾盆地膏盐发育区的地层过剩压力高于一般区^[14],徐士林等认为,库车坳陷区域分布的巨厚盐岩和膏泥岩盖层是其下部储层异常高压得以保存的重要条件^[15]。东营凹陷古近系深层异常压力与膏盐岩的分布具有良好的对应关系,在膏盐岩地层内部及其之下普遍发育异常高压带(图6);在平面图上,膏盐岩地层的分布范围以内基本上都存在异常高压(图4)。因此,可以肯定,膏盐岩的发育是东营凹陷古近系沙河街组四段异常高压存在的重要影响因素之一。

目前普遍认为膏盐层主要通过以下两种方式

来影响地层压力:第一,膏盐岩的塑性(物性)封堵作用;由于膏盐层具有塑性强、易流动的特点(盐岩层在常温常压下为固态或弱塑性,但是在温度压力增加时塑性明显变好,据计算埋藏500 m盐岩开始进入软化点,到3 000 m时可以达到极强的流动性^[15]),使裂缝与断层得以充填,从而使断层和裂缝消失在膏盐岩盖层中而无法穿透并到达膏盐岩之上的岩层,使得异常高压没有因为断层穿透盖层而散失^[16]。第二,膏盐岩的压力封闭机制;当膏盐层埋藏达到一定深度时,石膏将转化成硬石膏,并脱出近一半体积的结晶水,这些水进入相邻的地层孔隙中,将增大岩层中的孔隙流体压力,导致地层压力异常,同时膏盐岩具有很高的突破压力(克拉2井的库姆格列木群含膏盐泥岩的突破压力高于60 MPa^[17]),对早期地层压力具有很好的保护作用。东营凹陷古近系沙河街组四段地

层埋深一般大于 3 000 m,盐岩、膏泥岩和泥岩间互出现,而石膏的塑性流动机理与盐岩相似,尽管其塑性比盐岩要差得多,软化点也比盐高,但是当埋深超过 2 000 m 时,石膏就会变成硬石膏,析出近一半体积的水,而当石膏与盐、泥层交互沉积时会大大增加盐、泥岩的塑性^[18],增强了膏盐岩地层的物性封堵能力,同时,石膏转化为硬石膏而释放出的近一半体积的水引起泥岩欠压实而形成超压,对压实作用具有抑制效应,造成其自身及其下伏地层的欠压实,形成异常高压。因此,膏盐岩地层的压力封闭和物性封闭的双重封闭机制是形成东营凹陷古近系沙河街组四段地层超压的重要成因机制之一。

4 结论

1) 东营凹陷沙河街组四段沉积时期古盐度经历了由高值到低值的变化,共发育沙河街组四段下亚段第二套、第一套和沙河街组四段上亚段 3 套膏盐岩。在垂向序列上每一套膏盐岩都由几十个小的盐韵律层组成,其岩性主要是石膏、盐岩、膏质泥岩及泥膏岩,垂向上有比较明显的蒸发成因的沉积序列。沙河街组四段膏盐岩平面分布广泛,民丰洼陷、中央隆起带、牛庄洼陷及滨南-利津地区都有膏盐岩发育,具有环状分布特征,从湖盆中心向盆地边缘依次沉积盐岩-石膏-泥膏岩-碳酸盐岩-泥灰岩-碎屑岩。

2) 东营凹陷地层压力在垂向上表现为“双层结构”:浅层正常压力系统和深层超压系统,沙河街组四段上亚段顶部油页岩段和沙河街组四段下亚段顶部盐膏岩段分别为强超压,向下压力逐渐减弱为中超压或弱超压,沙河街组四段超压系统内部具有简单超压、复合超压等多种压力结构,地层压力在平面呈环带状分布,由沉积中心向盆地边缘压力逐渐降低,总体表现为北高南低的特征,并且异常压力的分布范围与膏盐岩的分布具有较好的对应关系。

3) 膏盐层的塑性和流动性使其具有良好的物性封堵能力,同时膏盐层中的石膏脱水增大邻近地层的孔隙压力,造成膏盐层及其下伏地层的欠压实,形成异常高压;膏盐岩地层的压力封闭和

物性封闭的双重封闭机制是东营凹陷沙河街组四段地层超压的形成重要机制之一。

参 考 文 献

1 冯友良. 东营凹陷下第三系层序地层格架及盆地充填模式 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999 24(6): 635~ 642

2 贾东,陈竹新,张愷,等. 东营凹陷伸展断弯褶皱的构造几何学分析 [J]. 大地构造与成矿学, 2005 29(3): 295~ 302

3 王文林. 东营凹陷古近系深层凝析气藏形成条件 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 55~ 57

4 宫秀梅,金之钧,曾澍辉,等. 渤南洼陷深层油气成藏特征及主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(4): 473~ 479

5 邱桂强,凌云,樊洪梅. 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 20(3): 71~ 75

6 陈中红,查明,金强. 东营凹陷超压系统的幕式排烃 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 444~ 447

7 赵振宇,周瑶琪,马晓鸣,等. 含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(2): 299~ 308

8 Rowan M G, Jackson M P A, Trudgill B D. Salt-related fault families and fault welds in the Northern Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(9): 1 454~ 1 484

9 Edgel H S. Salt tectonics in the Persian Gulf Basin [A]. In Alsop G J, Blundell D J, Davidson I eds. Salt tectonics [C]. London: Geological Society of London Special Publication 100, 1996. 129~ 151

10 游俊,郑凌茂,周建生. 深部地层异常压力与异常孔隙度及油气藏的关系 [J]. 中国海上油气 (地质), 1997, 11(4): 249~ 253

11 刘展,赵键,李云平,等. 东营凹陷盐膏层的重震联合解释技术 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2005, 29(6): 16~ 22

12 胡光明,纪友亮,张亚京. 陆相盐湖层序地层学研究简述 [J]. 盐湖研究, 2006, 14(1): 55~ 59

13 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~ 107

14 李熙哲,杨玉凤,郭小龙,等. 渤海湾盆地压力特征及超压带形成的控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 1997 18(3): 236~ 242

15 徐士林,吕修祥,周新源. 塔里木盆地库车坳陷天然气高压封存箱 [J]. 天然气地球科学, 2003 14(5): 362~ 365

16 王燮培,费琦,张家骅. 石油勘探构造分析 [M]. 湖北 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 78~ 156

17 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

18 周兴熙. 库车坳陷第三系盐膏质盖层特征及其对油气成藏的控制作用 [J]. 古地理学报, 2000 2(4): 51~ 57

(编辑 高 岩)