

文章编号: 1000-0550(2010)02-0395-06

# 东营凹陷民丰洼陷北带沙四段深层超压封存箱与油气成藏<sup>①</sup>

万念明<sup>1,2</sup> 王艳忠<sup>3</sup> 操应长<sup>3</sup> 宋国奇<sup>2</sup>

(1 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640 2 中国石化胜利油田分公司 山东东营 257004

3 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

**摘要** 东营凹陷沙三段、沙四段普遍发育超压,在沙三上亚段底部与沙三中亚段顶部钙质泥岩与暗色泥岩过渡带、沙四下亚段顶部和底部稳定盐膏岩层的封隔作用下,形成了两个超压封存箱,即沙三段—沙四上亚段超压封存箱和沙四下亚段超压封存箱。由于每个超压封存箱内均发育优质烃源岩,因此,沙三段、沙四段又可划分为两个相互独立的含油气系统,即沙三段—沙四上亚段含油气系统和沙四下亚段含油气系统。东营凹陷民丰洼陷北带沙四段深层近岸水下扇具有“扇根封堵、扇中富集、扇缘输导”的油气成藏特征,油气来自同期发育的、与近岸水下扇侧向接触的烃源岩,主要形成“自生自储”型岩性油气藏。

**关键词** 封存箱 超压 油气成藏 深层 东营凹陷

**第一作者简介** 万念明 男 1968 年出生 博士研究生 油气勘探与管理 E-mail: wnm@sbf.com

**通讯作者** 王艳忠 E-mail: wangyanzhong1980@yahoo.com.cn

**中图分类号** TE122.3 **文献标识码** A

东营凹陷中浅层油气勘探已进入中高成熟阶段,深层(埋深大于 3 500 m)已成为“增储上产”的重要勘探领域。近年来,东营凹陷北带沙四段深层油气勘探取得了重大突破,如丰深 1 井 4 316.6~4 343 m 日产油 81.7 t 日产气 118 336 m<sup>3</sup>,坨 764 井 3 947.5~3 970 m 日产油 15.21 t 日产气 1 043 m<sup>3</sup>。尽管东营凹陷沙四段深层蕴含着丰富的油气资源,但是由于对油气成藏规律认识不清,导致深层勘探成功率较低,目前日产油大于 5 t 的探井成功率仅为 10% 左右。东营凹陷沙三段—沙四段广泛发育区域性超压<sup>[1]</sup>,在稳定分布的膏盐岩和断层的封隔作用下形成多个相对独立的次级超压封存箱。勘探实践表明超压封存箱控制着油气的生成、运移和聚集<sup>[2~7]</sup>。因此,探讨民丰洼陷北带沙三段—沙四段深层超压封存箱对油气成藏的控制作用,对深层油气勘探具有重要的理论和实践意义。

## 1 地质概况

民丰洼陷北带位于东营凹陷北带东段,西与胜坨油田相邻,东到青坨子凸起,南邻民丰洼陷,北至陈家庄凸起(图 1)。民丰洼陷北带是由陈南铲式扇形边界断层所控制的陡斜坡构造带,陈南断裂早期是北东和北西两组断裂形成的齿状组合,在后期的构造运动

及风化剥蚀的共同作用下,演化成断坡陡峭、山高谷深、沟梁相间的古地貌<sup>[8,9]</sup>。东营凹陷古近系深层发育沙三下亚段、沙四段和孔店组二段共三套主力烃源岩层系,沙四下亚段顶部和底部分别发育一套全区稳定分布的盐膏岩层系,由于欠压实作用和生烃作用,在主力烃源岩层系中普遍发育超压<sup>[10]</sup>。沙四段沉积时期,民丰洼陷北部陡坡带受这种古构造背景的控制,季节性洪水携带大量粗碎屑物质沿古冲沟入湖,

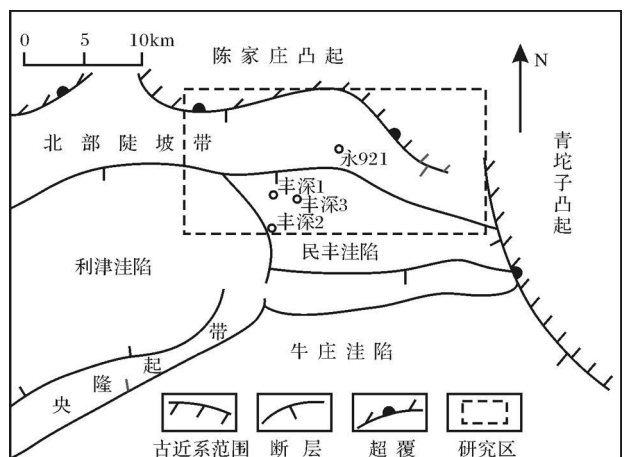


图 1 东营凹陷民丰洼陷北带区域地质概况  
Fig 1 Regional geologic schematic diagram of Minfeng Sag, Dongying Depression

<sup>①</sup>教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0604)、国家油气重大专项(编号:2008ZX05051-02)和国家自然科学基金项目(批准号:40972080)资助。收稿日期:2009-03-12 收修修改稿日期:2009-05-12

在边界断裂面上发育了多期近岸水下扇沉积。近岸水下扇砂砾岩紧邻生油中心分布,并与湖相烃源岩呈指状接触,是良好的油气聚集场所。

## 2 超压封存箱特征

超压封存箱是一个在三维空间被物理屏障(大多是渗透性很低的封隔层和断裂带)包围的相对独立的地质体。在大部分地质时期,其内部的物质、能量与外界没有明显交换,箱壳处的物质和能量的变化比较急剧;当箱壳因某种原因被破坏(如断裂开启等)便会发生物质和能量的交换;在盆地演化过程中,这种过程往往是旋回式的、幕式的<sup>[11]</sup>。封隔层既可以是渗透性极差的致密胶结层,也可以是具高孔隙流体压力泥岩层<sup>[12][13]</sup>。

东营凹陷沙三上亚段底部到沙三中亚段顶部存在80~200 m厚全区稳定分布的暗色泥岩夹钙质泥岩及薄层砂岩地层,暗色泥岩压力系数一般为1.1~1.2(图2)。钙质泥岩在压实排液过程中可形成致密的“壳”,这些“壳”与暗色泥岩可成为超压封存箱良好的物性封隔层<sup>[14]</sup>。沙四下亚段顶部和底部分别发育一套全区稳定分布的盐膏岩层,其岩性在深洼区和中央隆起带主要为盐岩或膏岩夹暗色超压泥岩,向盆地边缘逐渐变为泥质膏岩或膏质泥岩与泥岩互层(图2)。盐膏岩是非常致密的岩层,具有较强的塑性,可与超压泥岩共同成为超压封存箱良好的封隔

层。

由于沙三下亚段底部到沙三中亚段顶部钙质泥岩与暗色泥岩过渡带以及边界控盆断层的封隔作用,东营凹陷沙三段、沙四段超压体系可以看成是一个巨型封存箱<sup>[13]</sup>。同时,由于沙四下亚段顶部和底部盐膏岩层的封隔作用,沙三段、沙四段巨型封存箱又被分割成两个次一级封存箱,即沙三段—沙四上亚段封存箱和沙四下亚段封存箱(图2)。东营凹陷沙三段、沙四段烃源岩具有沉积速度快、连续沉积厚、有机质含量高、高地温梯度、高热流的特征,在压实不均衡和生烃作用的双向增压作用下,广泛发育超压<sup>[13]</sup>。封存箱体内部地层压力在凹陷中央为中强超压(压力系数多为1.3~1.8最高可达1.8以上),向盆地边缘逐渐递减为弱超压和常压,这种压力递减现象可能是由于边界断层周期性泄压所致。

## 3 超压封存箱与油气成藏的关系

### 3.1 超压封存箱内成藏条件

#### 3.1.1 烃源岩条件

勘探实践及研究表明民丰洼陷北带沙四上亚段和沙四下亚段均发育优质烃源岩。沙四下亚段顶部盐膏岩之间及盐膏岩层之下发育大规模暗色泥岩,厚度一般为200 m左右,丰深2井录井统计暗色泥岩厚度368 m,含膏(盐泥岩220 m,石膏(盐)质泥岩188 m)目前已经证实沙四下亚段具有较强的生烃能力,

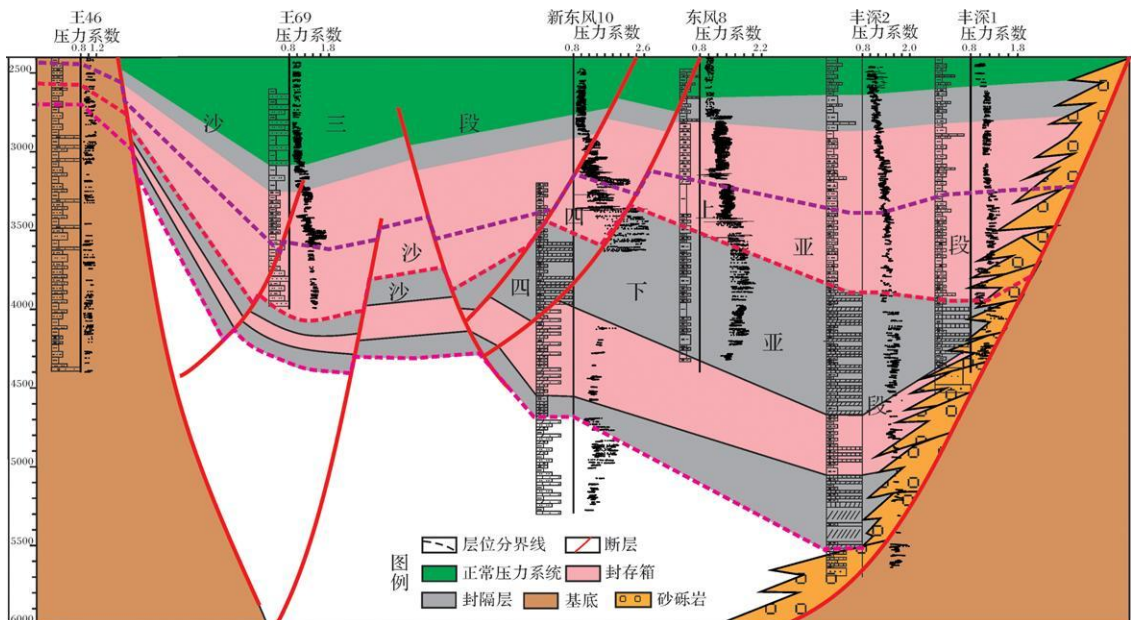


图2 东营凹陷沙三段、沙四段超压封存箱特征

Fig 2 Characteristics of overpressure compartment of E<sub>3</sub> and E<sub>4</sub> in Dongying Depression

有机质类型为偏腐殖至腐殖型, 如丰深 1 井发育单层厚度 2~20 m, 累积厚度大于 100 m 的暗色泥岩, 有机碳为 1.9%~3.2%, 为偏腐殖型和腐殖型, 氯仿“*A*”为 0.3%~0.9%,  $C_{29}S/(S+R)$  为 0.46,  $R_o$  为 0.9%, 为优质成熟烃源岩。沙四上亚段烃源岩主要分布于该亚段的上部, 岩性以灰色、深灰色、灰褐色、灰质泥岩、钙质油页岩、泥灰岩为主, 夹有少量碳酸盐岩和粉砂岩, 呈韵律层分布。有机质主要来源为低等水生生物, 有机质类型主要为腐泥组分, 含量一般大于 95%, 绝大多数为典型的 I 型富油干酪根, 具有很高的生烃潜力。

### 3.1.2 圈闭条件

综合利用分布函数曲线法、测试法、试油法、束缚水饱和度法、最小有效孔喉半径法等方法, 求取了民丰洼陷北带近岸水下扇砂砾岩有效储层物性下限<sup>①</sup>, 在此基础上, 通过对民丰洼陷北带沙四段深层近岸水下扇不同亚相砂砾岩体沉积特征、成岩作用特征及物性特征的深入研究, 详细论述研究区沙四段深层圈闭发育特征。

根据沉积特征和水动力条件等, 近岸水下扇可分为扇根、扇中和扇缘三个亚相。近岸水下扇不同亚相沉积、成岩的差异性, 控制了不同亚相砂砾岩物性特征的差异性, 进而控制了不同亚相砂砾岩的输导或封堵能力的差异性。

扇根亚相主要为杂基支撑砾岩相、沉积厚度大、分选差, 多期扇体扇根亚相之间缺乏正常湖相泥岩; 在埋藏过程中成岩作用主要以压实作用为主, 且在埋深大于 3 500 m 的深层表现为强压实成岩相, 原生孔隙已降低到不可压缩的状态, 同时次生孔隙不发育, 孔隙度分布包络线在孔隙度下限线内侧 (图 3), 基本不发育有效储层, 可作为油气侧向遮挡层。

扇中亚相为块状含砾砂岩相、叠覆冲刷砂岩相、典型浊积岩相等, 砂砾岩杂基含量较低、颗粒支撑、分选中等偏差、厚度中等, 多期扇体扇中亚相之间发育正常湖相泥岩 (特别是生油岩)。随着埋藏深度的增大, 压实作用和胶结作用等成岩作用逐渐增强, 扇中亚相砂砾岩原生孔隙逐渐降低, 但是, 多期扇中砂砾岩体之间的烃源岩由于欠压实和热演化生烃作用而普遍发育超压, 同时与之邻近分布的扇中砂砾岩孔隙流体压力多为常压, 在二者压差的驱动下, 烃源岩中有机质热演化成熟过程中产生的大量有机酸能够有效地进入扇中砂砾岩中, 形成大量次生孔隙 (图 4-A)。超压传递作用可导致扇中砂砾岩中形成超压,

抑制压实作用和胶结作用的进一步进行, 使砂砾岩中储集空间得以良好地保存<sup>[15-16]</sup>。此外, 当扇中砂砾岩中的超压超过岩石的抗张强度时, 超压砂砾岩中便形成一系列的超压微裂缝, 该裂缝规则性和方向性较差, 可将颗粒破碎成网络状和炸裂状, 如丰 8 井 4 321.4 m 沥青充填的孔隙四周发育的网络状裂缝 (图 4-B) 为原油裂解成气使孔隙内部压力增加, 岩石破裂而形成的超压微裂缝。有机酸溶解作用以及超压对储层的保护和改善作用, 致使深层扇中亚相砂砾岩中次生孔隙和超压裂缝发育, 孔隙度包络线一般均在孔隙度下限线外侧 (图 3), 有效储层发育, 可作为良好的油气储集层。

扇缘亚相主要为典型浊积岩相, 砂岩粒度细, 孔隙和超压微裂缝发育, 有效储层发育 (图 3), 但扇缘砂体厚度较薄, 对储层的贡献不大, 可作为良好的油气输导层。

综上所述, 民丰洼陷北带沙四段深层扇中亚相依靠扇根亚相砂砾岩的侧向封堵以及多期扇中亚相之间湖相泥岩的封盖, 能够形成良好的岩性圈闭。

### 3.1.3 油气运移条件

民丰洼陷北带沙四段深层近岸水下扇砂砾岩体紧邻生油中心分布, 与有效烃源岩呈指状交互接触。由前述可知封存箱内部深洼区地层压力为中强超压, 向盆地边缘逐渐递减为弱超压和常压, 即从深洼陷至盆缘跨越了中强超压、弱超压和常压三个压力系统, 这种压力的变化成为油气运移的主要驱动力, 能量条件决定了油气以侧向运移方式为主<sup>[8]</sup>。

## 3.2 超压封存箱与油气成藏

东营凹陷沙三段、沙四段被分割成两个相对独立的超压封存箱, 并且每个超压封存箱内均发育了稳定的优质烃源岩, 在沙三段、沙四段形成了两个相对独立的含油气系统, 即沙三段—沙四上亚段含油气系统和沙四下亚段含油气系统。东营凹陷古近系烃源岩一般在 2 200 m 左右开始进入有机质成熟期, 因此, 民丰洼陷沙四段深层烃源岩均已进入了成熟期, 均具备了向各自含油气系统内砂砾岩体提供油气源的能力。通过油源对比分析证实, 沙三段—沙四上亚段含油气系统的油气主要来自沙四上亚段和沙三段烃源岩, 而沙四下亚段含油气系统的油气主要来自沙四下亚段烃源岩, 如丰深 1 井原油与沙四段盐下暗色泥岩

① 操应长, 袁静, 王艳忠, 等. 济阳坳陷第三系深部有效储层评价研究. 中国石油大学 (华东), 2008

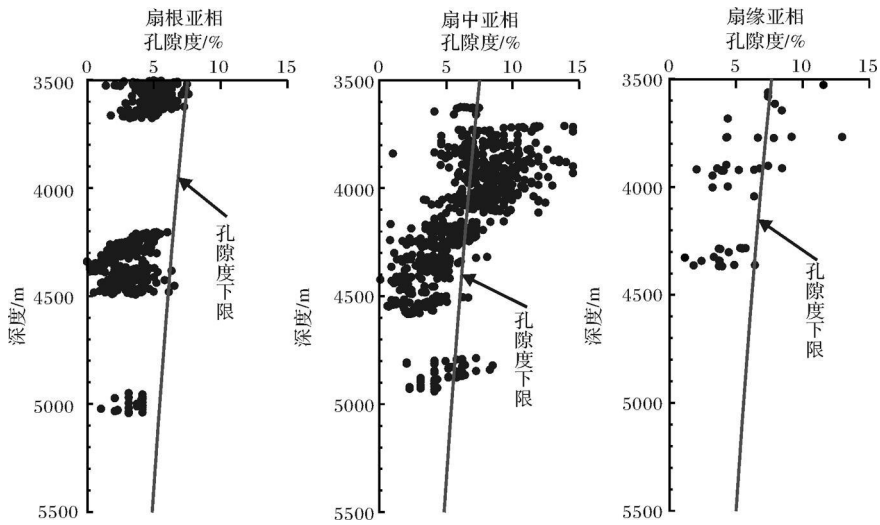
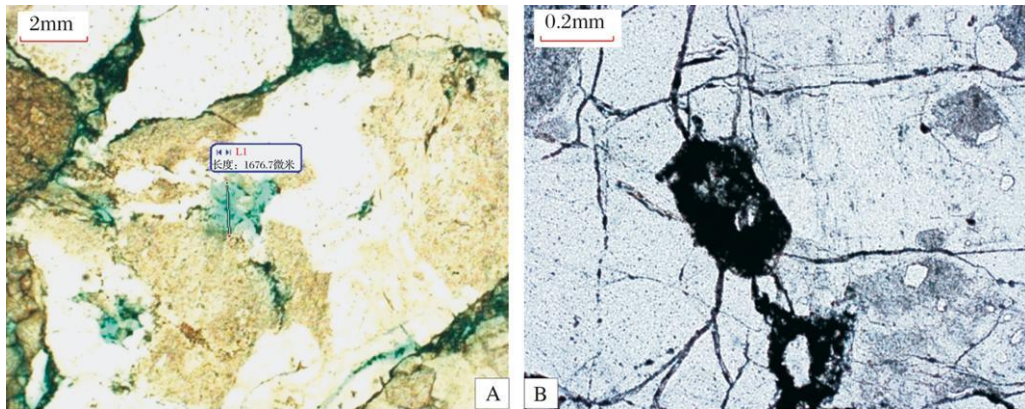


图 3 民丰洼陷北带沙四段近岸水下扇砂砾岩孔隙度—深度—孔隙度下限关系图

Fig 3 Relation of porosity with depth and porosity cutoff of nearshore subaqueous fan of E<sub>4</sub> in the north zone of Minfeng Sag



A 丰深 1 井, 4 350 m (—), 颗粒内溶孔; B 丰 8 井, 4 321.4 m (+), 超压微裂缝

图 4 民丰洼陷北带沙四段扇中砂砾岩储集空间特征

Fig 4 Reservoir space characteristics of middle fan sandy conglomerate of E<sub>4</sub> in the north zone of Minfeng Sag

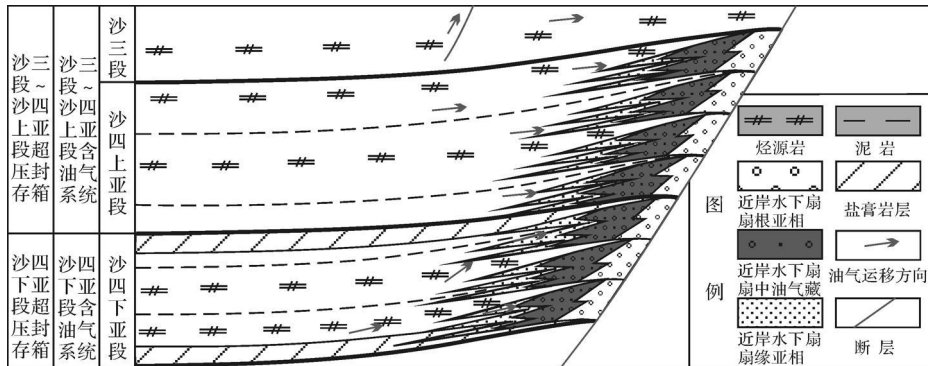


图 5 民丰洼陷北带沙四段深层油气成藏模式

Fig 5 Hydrocarbon accumulation model of the deep layer of E<sub>4</sub> in the north zone of Minfeng Sag

均具有植烷优势、中等含量的  $\gamma$  蜡烷的地球化学特征, 反映还原的半咸水环境特征, 这也是两个相对独立含油气系统客观存在的有利证据。

根据民丰洼陷北带沙四段深层超压封存箱、含油气系统以及油气成藏条件特征, 可将民丰洼陷北带沙四段深层油气成藏模式概括如下 (图 5): ①近岸水下扇扇根具有侧向封堵油气能力, 扇中具有良好储集条件, 扇缘分布于生油岩之中, 且超压微裂缝发育, 为油气运移提供了运移、输导条件, 形成了“扇缘输导、扇中富集、扇根封堵”的岩性油气成藏模式; ②油气来自同期发育的、与近岸水下扇侧向接触的烃源岩, 表现为“自生自储”型油气成藏特征。

## 4 结论

(1) 沙三上亚段底部与沙三中亚段顶部钙质泥岩与暗色泥岩过渡带、沙四下亚段顶部和底部盐膏岩层的封隔作用, 导致东营凹陷沙三段、沙四段形成两个超压封存箱, 即沙三段—沙四上亚段超压封存箱和沙四下亚段超压封存箱, 由于每个封存箱内均发育优质烃源岩, 进而形成两个相对独立的含油气系统, 即沙三段—沙四上亚段含油气系统和沙四下亚段含油气系统。

(2) 民丰洼陷北带沙四段深层具有“扇根封堵、扇中富集、扇缘输导”的油气成藏特征, 主要形成“自生自储”型岩性油气藏。

## 参考文献 (References)

- 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 [Xie Xinong, Liu Xiaofeng. 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): 103-107]
- 蒋有录, 张一伟, 冉隆辉, 等. 川东地区志留系—石炭系含气系统天然气运移聚集机理 [J]. 石油学报, 2001, 22(1): 25-30 [Jiang Youlu, Zhang Yiwei, Ran Longhui, et al. Migration and accumulation mechanism of natural gas in the Silurian-Carboniferous petroleum system of the east part of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 25-30]
- 陈建平, 黄第藩, 霍永录, 等. 酒东盆地异常流体压力带及与油气分布关系 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(1): 9-15 [Chen Jianping, Huang Difan, Huo Yonglu, et al. Formation and mechanism of the abnormal pressure zone and its relation to oil and gas accumulations in the Eastern Jiuquan Basin, northwest China [J]. Science in China Series D, 1996, 26(1): 9-15]
- 周兴熙. 塔里木盆地库车油气系统中, 新生界的流体压力结构和油气成藏机制 [J]. 地质前缘, 2001, 8(4): 351-360 [Zhou Xingxi. The Mesozoic-Cenozoic fluid pressure structure and reservoir-forming mechanism in the Kuqa petroleum system in the Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 351-360]
- 王屿涛, 范光华, 蒋少斌. 准噶尔盆地腹部高压和异常高压对油气生成和聚集的影响 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 1-7 [Wang Yutao, Fan Guanghua, Jiang Shaobin. The effect of high pressure and abnormally high pressure on the generation and accumulation of petroleum in hinterland of Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(5): 1-7]
- 郝石生, 高耀斌, 黄志龙. 鄂尔多斯盆地中部大气田聚集条件及运聚平衡 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(6): 488-492 [Hao Shisheng, Gao Yaobin, Huang Zhilong. Characteristics of dynamic equilibrium for natural gas migration and accumulation of the gas field in the center of Ordos Basin [J]. Science in China Series D, 1996, 26(6): 488-492]
- 龚再升, 陈红汉, 孙永传. 莺歌海盆地流体压力自震荡与天然气模式成藏的耦合特征 [J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(1): 68-74 [Gong Zaisheng, Chen Honghan, Sun Yongchuan. Coupling processes between self-oscillation of formation pressure and periodic migration-accumulation of natural gases in Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Science in China Series D, 1999, 29(1): 68-74]
- 隋风贵. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩扇体成藏动力学特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 335-340 [Sui Fengui. Characteristics of reservoiring dynamics on the sand-conglomerate fanbodies in the steep-slope belt of continental fault basin: A case study on Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 335-340]
- 孔凡仙. 东营凹陷北带砂砾岩扇体勘探技术与实践 [J]. 石油学报, 2000, 21(5): 27-31 [Kong Fanxian. Exploration technique and practice of sandy-conglomeratic fans in the northern part of Dongying Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 27-31]
- 陈中红, 查明, 张善文, 宋国奇等. 东营凹陷古近系天然气成藏条件及其主控因素 [J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 9-12 [Chen Zhonghong, Zhang Ming, Zhang Shanwen, et al. Conditions and main controlling factors of natural gas pooling in the Paleogene in Dongying Sag [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9): 9-12]
- 周兴熙. 封存箱辨义及主要类型 [J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 424-429 [Zhou Xingxi. Discussion on meaning and main types of compartment [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(5): 424-429]
- 郭秀蓉, 刘晓峰. 压力封闭层的类型及成因刍议 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 31-34 [Guo Xiurong, Liu Xiaofeng. Primary discussion on types and origins of pressure seals [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2006, 13(5): 31-34]
- 陈中红, 查明. 东营凹陷流体超压封存箱与油气聚集 [J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 607-615 [Chen Zhonghong, Zhang Ming. Overpressured fluid compartment and hydrocarbon migration and accumulation in Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 607-615]
- 胡济世. 异常高压、流体压裂与油气运移 [J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(2): 16-23 [Hu Jishi. Abnormal pressure, fluid fracturing

- and migration of oil and gas [J]. *Petroleum Exploration and Development* 1989 16(2): 16-23]
- 15 高勇, 张连雪. 板桥—北大港地区深层碎屑岩储集层特征及影响因素研究 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 36-39 [ Gao Yong Zhang Lianxue Characteristics of deep clastic reservoir in Banqiao-Beidagang area of Huanghua depression and their causing factors [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2001 28(2): 36-39]
- 16 陈纯芳, 赵澄林, 李会军. 板桥和歧北凹陷沙河街组深层碎屑岩储层物性特征及其影响因素 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2002 26(1): 4-7 [ Chen Chunfang Zhao Chenglin Li Huijun Physical properties of reservoir and influencing factors of deep burial clastic rocks in Banqiao-Qibei sag [J]. *Journal of the University of Petroleum China* 2002 26(1): 4-7]

## Overpressured Fluid Compartment and Hydrocarbon Accumulation of Deep Layer of $E_{s4}$ in the North Zone of Minfeng Sag Dongying Depression

WAN Nian-ming<sup>1, 2</sup> WANG Yan-zhong<sup>3</sup> CAO Ying-chang<sup>3</sup> SONG Guo-qí<sup>2</sup>

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510640)

2 Sinopec Shengli Oilfield Company Dongying Shandong 257001;

3 College of Geo-Resources and Information China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061)

**Abstract** Overpressure is widespread developed in the third member ( $E_{s3}$ ) and the forth member ( $E_{s4}$ ) of the Shahejie Formation of Dongying Depression.  $E_{s3}$  and  $E_{s4}$  are divided into two compartments ( $E_{s3}$ - $E_{s3s}$  compartment and  $E_{s4x}$  compartment) by sealing of the Calcareous mudstone and dark mudstone transition zone at the bottom of the upper part and the middle part of  $E_{s3}$  and the salt gypsum formation at the top and bottom of the Lower part of  $E_{s4}$  ( $E_{s4x}$ ). Good Source Rock is developed respectively in the two compartments, so  $E_{s3}$  and  $E_{s4}$  can be divided into two mutually independent petroleum systems ( $E_{s3}$ - $E_{s3s}$  petroleum system and  $E_{s4x}$  petroleum system). "Root-fan sealing mid-fan accumulation, outer-fan migration" is the characteristic of the hydrocarbon accumulation in deep layer of nearshore subaqueous fan of  $E_{s4}$  in the north zone of Minfeng Sag. Hydrocarbon from the contemporaneous source rocks accumulates in the middle-fan and forms "self-generation and self-accumulation" lithologic reservoir.

**Key words** compartment; overpressure; hydrocarbon accumulation; deep layer; Dongying Depression