

大民屯凹陷超压的发育演化及油气运聚的动力学机制

彭 波¹, 邹华耀¹, 滕长宇¹, 郝 芳^{1,2}

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

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:通过 186 口探井 545 组实测储层压力数据的统计分析,采用等效深度法对 65 口井泥岩段声波时差进行压力计算,并利用数值模拟技术对大民屯凹陷超压的发育演化进行研究,结合应力场演化与断裂发育分布和活动强度性分析,探讨大民屯凹陷厚层烃源岩排烃的动力学机制。结果表明:凹陷内超压普遍发育;快速沉降沉积和生烃作用是超压发育的主控因素;沙四段沉积期超压开始发育并迅速增大,在沙一段沉积期达到最高,随后逐渐泄放降低,断裂发育少的地区超压发育,断裂密集发育区超压发育相对较弱;在超压的作用下地下流体以幕式流动为主;阐明了大民屯凹陷超压主导型和构造活动-超压联控型两种幕式成藏的动力学机制。

关键词:超压;幕式油气成藏;动力学机制;水力破裂;大民屯凹陷

中图分类号:TE 121.1

文献标志码:A

Evolution of overpressure and dynamic mechanism of hydrocarbon migration and accumulation in Damintun depression

PENG Bo¹, ZOU Hua-yao¹, TENG Chang-yu¹, HAO Fang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract:Based on 545 reservoir pressure measurements in 186 boreholes and the calculated shale pressure of 65 boreholes using equivalent depth method, the evolution and distribution characteristics of overpressure in Damintun depression were studied by using numerical simulation method. The dynamic mechanism of hydrocarbon expulsion from the thick source rock was discussed through the integrated analysis of the evolution, distribution and activity of faulting in the depression. The results show that overpressure is extensively developed in the depression. Compaction disequilibrium resulted from high sedimentary rate and hydrocarbon generation are the main controlling factors for the development and evolution of overpressure. The numerical simulation shows that overpressure increased gradually from the period of Es₄ and reached maximum at the period of Es₁. The development of overpressure is relatively slower in the faulting zone. It is suggested that overpressured fluid is mainly episodically expelled from geopressed sediments. The dynamic mechanism of overpressure-dominated and tectonic-overpressure controlled episodic petroleum accumulation includes natural hydraulic fracture, mud diapir, faulting dominated and overpressure promoted.

Key words: overpressure; episodic petroleum accumulation; dynamic mechanism; natural hydraulic fracture; Damintun depression

大民屯凹陷古近系分布面积约为 800 km², 其含油气丰度很高, 石油远景资源量为 5.7×10⁸ t, 石油地质储量 3.2×10⁸ t, 为一典型的“小而肥”的陆相

凹陷。前人对本地区的油气成藏机制^[1]、温压场演化^[2-3]、油气运聚史^[4]及生油岩排烃^[5]等方面进行了一定的研究,但是系统性地探讨油气运聚过程及

收稿日期:2013-06-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(90914006;41272165)

作者简介:彭波(1983-),男,博士研究生,主要从事油气成藏机制方面的研究。E-mail: pengbe18@163.com。

其动力学机制的研究甚少,尤其是针对大民屯凹陷巨厚层烃源岩的排烃机制以及密集发育断层与原油运移、富集和保存的关系没有开展研究。笔者在大民屯凹陷压力场研究的基础上结合应力场发育探讨大民屯凹陷油气初次运移与二次运移、聚集的动力学和运动学机制,揭示凹陷油气富集的关键因素。

1 区域地质概况

大民屯凹陷位于渤海湾盆地地下辽河拗陷最北端(图1),东北向展布,发育4个负向构造单元安福屯洼陷、荣胜堡洼陷、三台子洼陷和胜东洼陷,以及前进半背斜构造带、静安堡构造带、边台-法哈牛构造带。凹陷主要为巨厚的新生界所覆盖,最大埋深超过6.0 km(位于荣胜堡洼陷),主力烃源岩为沙四上亚段下部的油页岩和上部的暗色泥岩以及沙三段的暗色泥岩。盆地广泛发育厚层连续烃源岩,钻井揭示最大厚度超过500 m,累积厚度可超过1 000 m。目前已在凹陷内发现了5套含油气层系,主要油气富集带位于凹陷中部的静安堡构造带与前进构造带,前新生界潜山和古近系沙三段砂岩是最重要的产层。

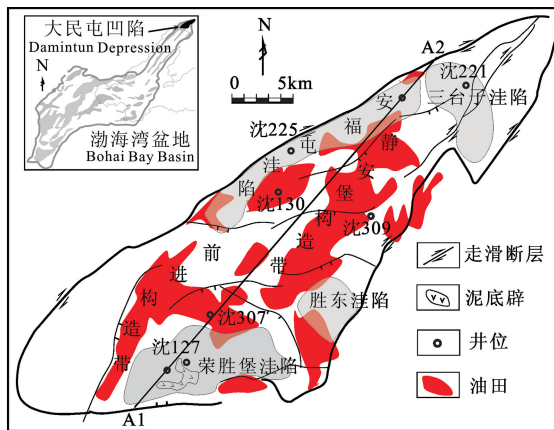


图1 大民屯凹陷构造位置与构造单元划分

Fig.1 Location and distribution of structure units of Damintun depression

2 压力场的发育演化

沉积盆地超压的发育在世界范围内普遍存在^[6],大量的实践充分表明,压力是油气排出、运移和聚集的重要动力^[7],超压的形成演化和分布与油气运聚成藏有着密切关系,在油气运移通道^[8]、油气藏的分布^[9-10]、流体的侧向和顺断层垂向运移的动力^[11]等方面发挥着重要的作用。

2.1 现今压力场分布

对大民屯凹陷186口探井545组实测储层压力数据进行统计分析,结果表明本地区现今储层压力系数约为1.0(图2),不发育超压。

系统分析研究区65口探井的泥岩声波时差响应特征,结果表明超压在大民屯凹陷广泛发育,声波时差揭示的孔隙度压实趋势在沙三二亚段及以下地层中都表现出明显偏离正常压实趋势的特征(图2)。利用等效深度法,对已提取泥岩段声波时差的65口井进行压力计算,结果表明大民屯凹陷现今主要发育压力系数1.0~1.6的弱超压和中等程度的超压。

2.2 超压的发育机制

超压的成因机制十分复杂,受多种因素控制,包括不均衡压实作用、生烃作用、构造挤压、黏土矿物脱水、水热增压、原油裂解生气和浮力增压等,国内外学者对此做出了一定的总结^[10,12-13]。统计显示,欠压实与烃类生成以及两者的共同作用是非挤压型盆地超压发育的主要机制^[10]。

新生代以来,大民屯凹陷经历了多期非均匀性伸展裂陷,具有较高的沉降、沉积速率(图3)。从荣胜堡洼陷和安福屯洼陷的两口洼陷中心的虚拟井(图1)的沉积速率来看,沙四段以及沙三段沉积期盆地经历了强烈的裂陷,沉积速率高,最高可达到1.6 km/Ma,沙三末期裂陷程度减弱,沙一段沉积速率仅约为300 m/Ma,东营组沉积期至今,裂陷作用基本停止,仅沉积了较薄的地层。据前人研究,沉积速率大于200 m/Ma的低渗透泥岩层即可发育超压^[14-15],本地区沙四段和沙三段地层发育厚层连续的油页岩和暗色泥岩,泥质含量高,这种细粒沉积物在如此高的沉积速率下必然引起压实不均衡,发育超压。

大民屯凹陷沙四段和沙三四亚段是本区的主力烃源岩层系,其中沙四段油页岩有机质含量极高,最大值为13%,平均值为6.50%,暗色泥岩TOC为0.06%~10.49%,平均值为1.89%,沙三四亚段泥岩TOC为0.03%~5.91%,平均值为1.37%,两套烃源岩皆具有较高的有机质丰度和强生烃能力。生烃史模拟^[1]表明,烃源岩有机质经历了早期快速埋藏快速成熟的过程,在约40 Ma,即沙三二亚段沉积期开始大量生烃并在沙一沉积末期达到生烃高峰(图3)。烃源岩超压演化与热成熟生烃之间良好的匹配关系表明烃类生成对超压的发育的贡献。

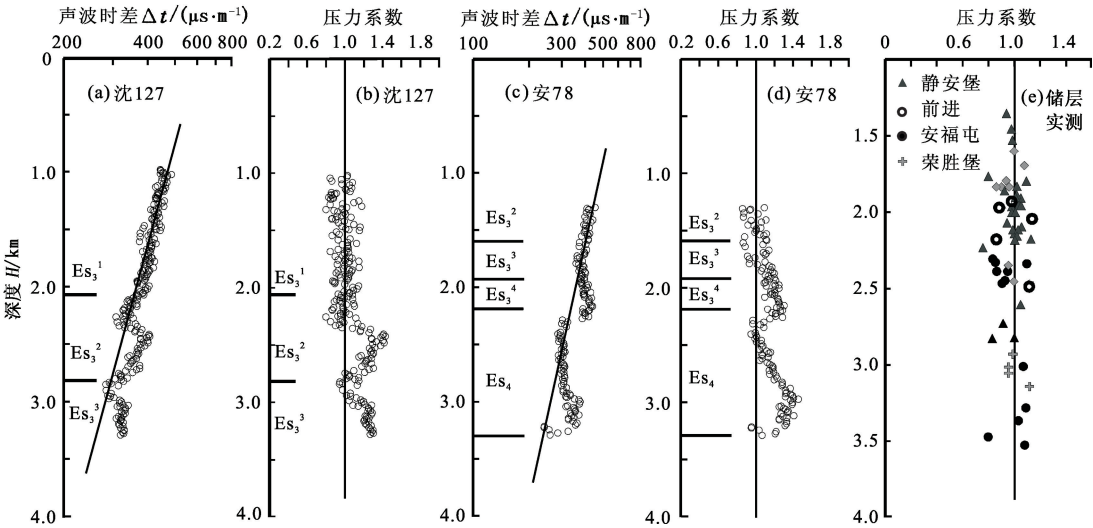


图 2 沈 127 井与安 78 井泥岩声波时差和压力系数以及储层实测压力系数分布

Fig. 2 Mudstone interval transit time and pressure coefficients of well Shen 127 and well An 78, and distribution of measured formation pressure coefficients of reservoirs in some wells

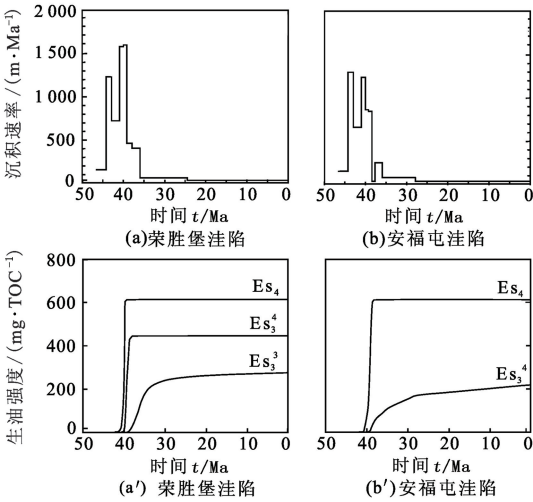


图 3 荣胜堡洼陷和安福屯洼陷中心虚拟井沉积速率与生油强度

Fig. 3 Sedimentary rate and oil generation of simulated well in the center of Rongshengbao and Anfutun sag

2.3 超压发育演化的数值模拟

为了更确切地揭示压力场的演化过程,本次研究采用 IES (integrated exploration systems) 模拟软件对大民屯凹陷超压的发育演化进行模拟恢复。烃源岩增压机制与数学模型主要涉及到泥岩欠压实和生烃作用^[16],同时考虑了流体的侧向运移、垂向上渗漏以及沿断层的垂向穿层运移作用,模拟参数包括封闭层或低渗泥岩层的渗透率、侧向上渗透性砂岩层的分布和垂向上断层活动导致的封闭性变化^[17]等,泥岩层渗透率值对超压模拟至关重要^[14]。

本次模拟选取过荣胜堡洼陷和安福屯洼陷的剖面 A₁-A₂,并提取剖面上过洼陷中心的两口虚拟井。

模拟结果(图 4、5)表明,大民屯凹陷压力的演化经历了早一晚两个阶段(增压-泄压旋回),自沙四段沉积期(45 Ma)超压开始发育,随着沙四段及沙三段细粒沉积物的快速沉积,引起强烈欠压实,超压迅速增加,并在沙一沉积末期达到最大,东营组沉积期以来,盆地进入拗陷期,只沉积了较薄的地层,超压逐渐泄放降低。

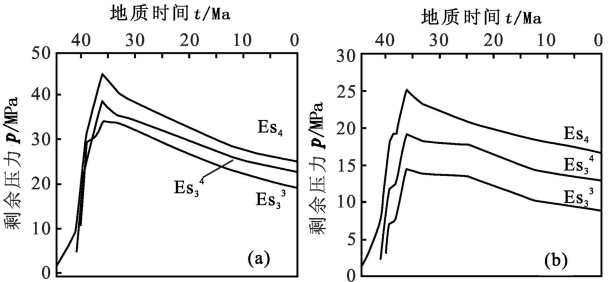


图 4 荣胜堡洼陷(a)和安福屯洼陷(b)中心烃源岩超压的演化

Fig. 4 Evolution of source rock overpressure in the center of Rongshengbao(a) and Anfutun(b) sag

不同构造单元超压的发育具有不同的特征(图 5)。洼陷中心处(荣胜堡、安福屯洼陷)发育厚层连续低渗透泥岩层,断层发育少,有利于超压的保存,荣胜堡洼陷沙四段超压发育最大,剩余压力可达到 45 MPa,安福屯洼陷沙四段剩余压力达到 25 MPa;凹陷中部静安堡构造带,断裂发育密集,特别沙一段沉积期,断层活动性强,连通性好,超压流体易通过断裂与砂体组成的输导体系排放,剩余压力仅为 15 MPa。

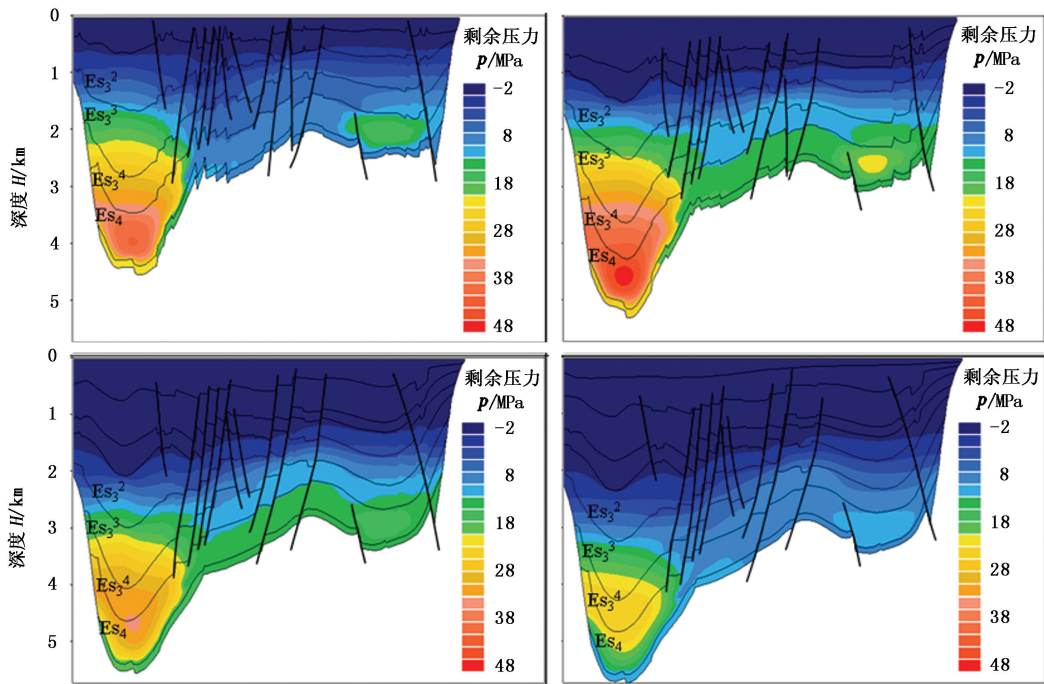


图 5 大民屯凹陷剖面 A_1 - A_2 剩余压力演化史

Fig. 5 Excess pressure evolution of cross-section A_1 - A_2 in Damintun depression

3 盆地流体或油气运移聚集的动力学机制

油气运移一直是油气成藏机制研究中的难点和重点,运移的动力主要来自浮力和水动力^[18],异常地层压力^[7,10]、构造作用力和地震泵作用等也被一些研究者认为是油气运移的动力。

郝芳^[10]将地下流体流动分为稳态和瞬态流体流动两类,其中瞬态流体流动可分为事件型流动和幕式流动。幕式排放和穿层运移是超压流体流动的最重要特征之一^[7,10,19-20]。并依据幕式成藏的动力学机制划分为超压主导型、构造活动-超压联控型和超压-构造活动联控型 3 种幕式成藏类型^[10]。

大民屯凹陷是中国东部断陷盆地中典型的超压盆地,在超压的作用下地下流体以幕式流动为主,其成藏类型主要为超压主导型和构造活动-超压联控型。盆地内广泛发育厚层连续烃源岩,最大连续厚度可达 500 m,累积厚度超过 1000 m,并不符合传统的理想生储配置关系,但如此巨厚的烃源岩却排出大量的原油,其油气运聚具有独特的动力学机制:以超压为主导的水力破裂和泥底辟,以及构造断裂活动-超压联控。

3.1 以超压为主导的水力破裂和泥底辟作用

地下岩层中孔隙流体压力达到岩层破裂压力

时,地层发生水力破裂(hydraulic fracture),并形成水力裂缝^[7,20]。Snarsky^[21]提出当地层压力达到静水压力的 1.4 ~ 2.4 倍时,即可发生水力破裂;Anderson^[22]认为当流体压力达到或超过约静岩压力的 85% 时,地层发生垂向水力破裂。对于水力破裂的发育、产状、规模以及保存等前人已做过大量的研究^[23-25]。

天然水力破裂对超压盆地油气成藏具有重要的意义。水力裂缝可以明显提高泥/页岩的孔隙度和渗透率,使常压环境主要作为封闭层或盖层的泥/页岩成为有效的输导层,改善其侧向输导能力^[10,26-28]。Leythaeuser^[28]对德国西北部早侏罗统图阿尔阶 Posidonia 页岩的研究结果证明了油气通过泥/页岩中的微裂缝进行了侧向运移。天然水力破裂裂缝可以成为有效储层并形成泥岩裂缝油气藏^[29],如以裂缝化绿河页岩为储层的美国尤英塔盆地 Altamont 油田和以裂缝化 Pierre 页岩为储层的科罗拉多 Florence 油田,以及中国东部渤海湾盆地东濮凹陷和济阳坳陷的部分泥/油页岩。

超压的数值模拟结果表明,在沙一段沉积期,荣胜堡洼陷和安福屯洼陷中心烃源岩层系发育强超压,最大压力系数皆大于 1.96(图 6),在油气主运聚期^[4],即沙一段沉积期烃源岩层系特别是油页岩中产生大量水力裂缝,为油气的侧向和垂向运移提供通道。

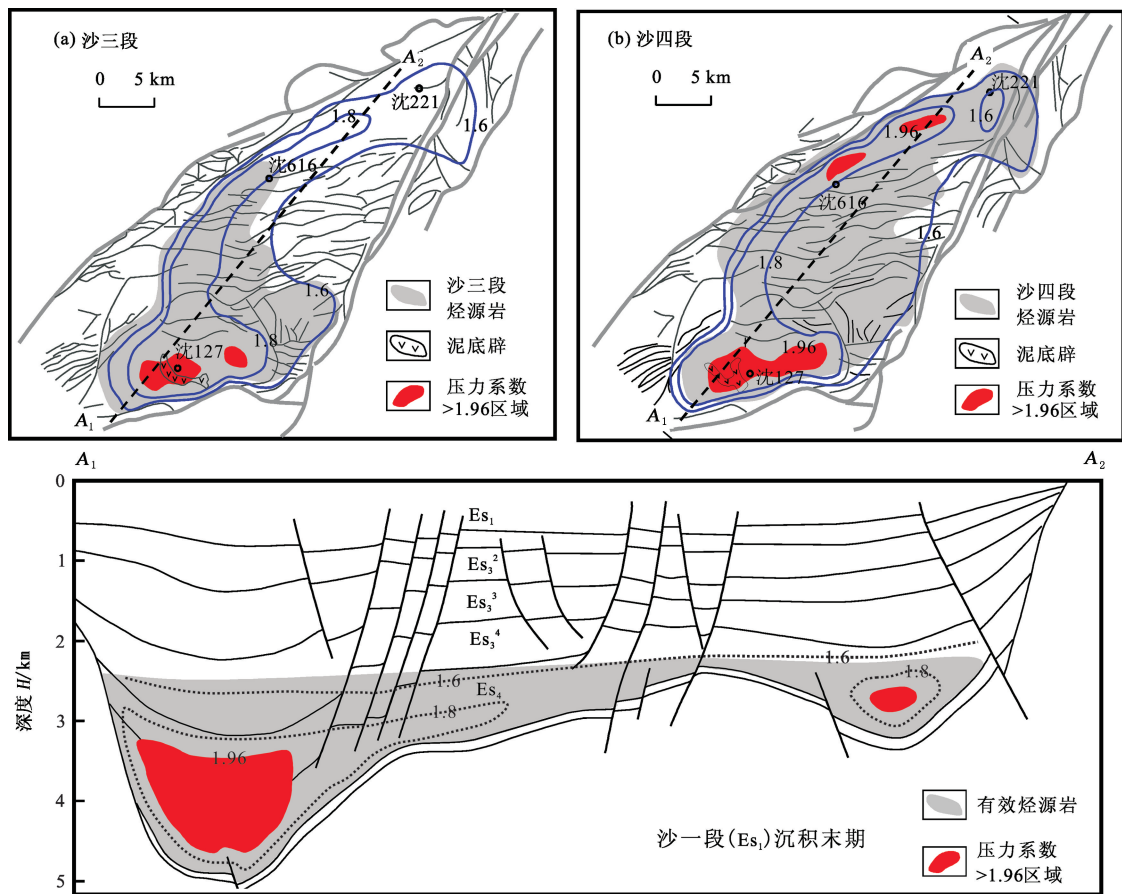


图 6 沙一沉积期沙三段和沙四段最大压力系数分布

Fig. 6 Distribution of simulated pressure coefficient of Es_3 and Es_4 formation

沉积盆地快速沉降并充填的厚层细粒沉积物在内部强超压发育的基础上,因岩石物性的差异,脆性岩层如油页岩易发生水力破裂,而黏性及塑性较强的泥岩(盐岩)易发生塑性流动形成底辟。盐底辟及其伴生构造的发育机制已得到广泛的研究,前人对莺歌海盆地的泥底辟发育机制及其成藏效应进行了充分的研究^[30-31],泥底辟带是油气或超压流体排放、运移和汇聚成藏的有利场所。大民屯凹陷荣胜堡洼陷中心区域发育泥底辟(图 1),泥丘核部沙四段和沙三四亚段发育优质烃源岩,地质时期大量生烃,底辟的发育为烃类流体的排放、垂向和侧向运移并汇聚成藏提供了有利通道。如图 7 所示,泥丘核部源岩生成的油气不仅沿内部水力破裂形成的有利输导通道进行侧向运移,亦发生垂向运移,并且在进入浅部储层后继续进行侧向运移。泥丘核部水力裂缝的发育可成为良好的储集层并汇聚油气成藏,底辟带附近的沈 143 井和沈 127 井泥丘翼部油气藏的存在便是良好的佐证。

3.2 构造断裂活动-超压联控

断裂在油气运聚成藏中具有重要的作用,既可

为油气成藏提供封堵条件,又可以为油气的垂向运移提供有利通道。邹华耀^[32]对渤海盆地油气运聚期断层活动速率与断层开启与封闭的统计关系分析表明,活动速率小于 10 m/Ma 的断层主要起封闭作用,大于 10 m/Ma 的断层连通性较好垂向上起输导作用。郝芳^[10]针对油气运移所作的物理模拟实验结果表明,在幕式充注条件下,流体运移能量充足,在连通型断层的输导作用下,可形成沿断层垂向分布的多含油层系。

新生代以来,大民屯凹陷经历了两期构造应力场作用,即盆地早期古新世至始新世的拉张作用与渐新世以来受郯庐断裂强烈活动引起的右旋走滑作用。在两期构造应力场作用下,盆地主要发育两套断裂系统,即由早期拉张作用形成的张性断裂系统和走滑作用形成的走滑断裂系统。其中早期拉张作用形成的断裂切过基底延伸到沙四段,呈北东向展布,近东西向断层主要为晚期走滑作用形成。沙三段底部断层展布以东西向为主,为晚期右旋走滑应力场形成。

从南至北选取 4 条连通源岩的断层(图 7(a))

分别计算了油气主充注期沙一段沉积期^[4]以及东营组沉积期的活动速率(图 7(c))。结果表明,自南向北断层活动速率逐渐减弱,沙一期明显高于东营期,且东营期活动速率基本小于 15 m/Ma,大部分小于 10 m/Ma,断层主要起封闭作用。沙一期南部(1)号断层活动速率较高,普遍大于 20 m/Ma,连通性好,主要起输导作用;(2)号断层活动特征分两段,断层西半部活动速率一般小于 10 m/Ma 起封堵作用,东半部普遍大于 15 m/Ma 主要起输导作用;

北部的(3)号断层活动速率减弱,一般小于 15 m/Ma,(4)号断层则基本小于 10 m/Ma,这两条断层主要起封堵作用。油藏剖面图(图 7(b))中南部地区成熟烃源岩中生成的油气沿活动速率较高的断层垂向穿层运移,向上运移至浅部的沙三三和沙三二亚段储层中汇聚成藏,以及向下进入基岩储层中;北部地区断层活动弱,主要起封堵作用,成熟烃源岩中生成的油气主要在沙三四和基岩储层中汇聚或侧向运移,并没有沿断层垂向运移。

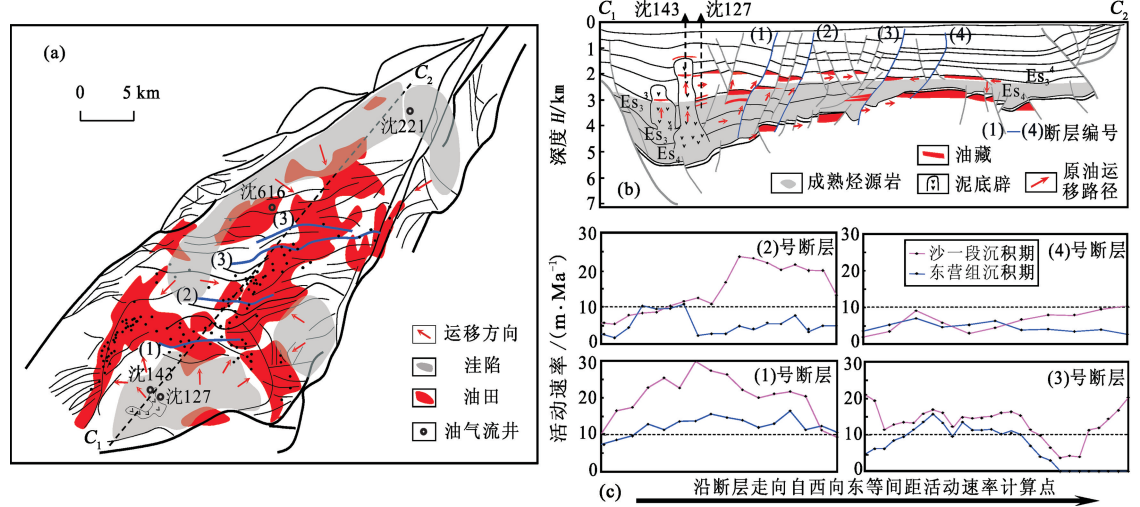


图 7 油气运移方向及断层活动速率时空分布

Fig. 7 Map of oil migration pathways and distribution of fault activity rate

数值模拟结果表明,在构造断裂发育区,油气主运聚期成熟烃源岩中主要发育压力系数约为 1.7 的超压,为油气的运移提供充足的动力。

4 结 论

(1)大民屯凹陷现今储层为常压,泥岩段发育压力系数为 1.0~1.6 的弱至中等程度超压;盆地快速沉降沉积和生烃作用是盆地强超压的发育机制;超压的演化经历了由低到高,并在沙一段沉积期达到最高,随后逐渐减弱的过程。在洼陷中心处,构造断裂少,发育强超压,并在荣胜堡洼陷中心形成泥底辟,而在断裂密集发育区,超压发育相对较弱。

(2)在超压的作用下地下流体以幕式流动为主,成藏类型主要为超压主导型和构造活动-超压联控型,油气运聚的动力学机制主要为以超压为主导的水力破裂和泥底辟以及构造断裂-超压联控。在油气主运聚期,活动速率高,连通性好的断层,在超压的作用下油气沿断层发生垂向幕式充注,形成多套含油层系,活动速率低,连通性差的断层主要起封闭作用。

参考文献:

[1] 陈振岩,陈永成,郭彦民,等. 大民屯凹陷精细勘探实践与认识[M]. 北京:石油工业出版社,2007:3-115.

[2] 姜建群,李军,史建南,等. 大民屯凹陷古今地温场特征及其成藏意义[J]. 沉积学报,2004,22(3):541-546.

JIANG Jian-qun, LI Jun, SHI Jian-nan, et al. Geothermal characteristics of Damintun sag and its significance for petroleum accumulation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(3):541-546.

[3] 谢文彦,姜建群,史建南,等. 大民屯凹陷压力场演化及其成藏意义[J]. 石油学报,2004,25(6):48-52.

XIE Wen-yan, JIANG Jian-qun, SHI Jian-nan, et al. Evolution of geopressure field in Damintun sag and its significance on hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004,25(6):48-52.

[4] 姜建群,张占文,李军,等. 大民屯凹陷油气运聚史研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2005,35(3):326-331.

JIANG Jian-qun, ZHANG Zhan-wen, LI Jun, et al. The study on hydrocarbon migration and accumulation history

- in Damintun depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(3): 326-331.
- [5] 耿安松, 傅家谟, 盛国英, 等. 辽河油田大民屯凹陷下第三系生油岩排烃研究[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(2): 117-124.
- GENG An-song, FU Jia-mo, SHENG Guo-ying, et al. Investigation of hydrocarbon expulsion from Eocene source rock in Damintun depression, Liaohe Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1991, 12(2): 117-124.
- [6] 杜棚, 郑红印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 137-146.
- DU Ling, ZHENG Hong-yin, JIAO Xiu-qiong. Abnormal pressure and petroleum distribution [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 137-146.
- [7] HUNT J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1-12.
- [8] WILKINSON M, HASZELDINE R S, FALLICK A E. Hydrocarbon filling and leakage history of a deep geopressured sandstone, Fulmar formation, United Kingdom North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(12): 1945-1961.
- [9] 刘景东, 蒋有录, 高平. 东濮凹陷濮卫地区地层压力演化及其与油气运聚的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 25-31.
- LIU Jing-dong, JIANG You-lu, GAO Ping. Evolution of formation pressure and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Puwei area, Dongpu depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 25-31.
- [10] 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: 3-268.
- [11] BOLES J R, EICHHUBL P, GARVEN G, et al. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: evidence from fault cement [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 947-970.
- [12] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a revaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [13] MAGARA K. Compaction and fluid migration: practical petroleum geology [M]. New York: Elsevier, 1978: 8-96.
- [14] MELLO U T, KARNER G D. Development of sediment overpressure and its effect on thermal maturation: application to the Gulf of Mexico Basin [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(9): 1367-1396.
- [15] OLE VALDEMAR VEJBÄK. Disequilibrium compaction as the cause for Cretaceous—Paleogene overpressures in the Danish North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(2): 165-180.
- [16] HANTSCH T, KAUERAUF A I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling [C]. Berlin: Springer, 2009: 31-101.
- [17] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [18] 王捷, 关德范. 油气生成运移聚集模型研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [19] ROBERTS S J, NUNN J A. Episodic fluid expulsion from geopressed sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 195-204.
- [20] CAILLET G, JUDGE N C, BRAMWELL N P, et al. Overpressure and hydrocarbon trapping in the Chalk of the Norwegian Central Graben [J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3(1): 33-42.
- [21] SNARSKY A N. Die primäre migration des Erdöls [J]. Freiburger Forschungsh, 1962, 123: 63-73.
- [22] ANDERSON R N, HE W, HOBART M A, et al. Active fluid flow in the Eugene Island area, offshore Louisiana [J]. Geophysics: the Leading Edge of Exploration, 1991, 89: 12-17.
- [23] MANDL G, HARKNESS R M. Hydrocarbon migration by hydraulic fracturing [M] // Eds JONES M E, PRESTON R M F. Deformation of sediments and sedimentary rocks. London: Spec Publ Geol Soc, 1987(29): 39-53.
- [24] VERNIK L, CHARLES L. Elastic anisotropy of source rocks implication for hydrocarbon generation and primary migration [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(4): 531-544.
- [25] COSGROVE J W. Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: a factor in the dewatering of low-permeability sediments [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 737-748.
- [26] CAPUANO R M. Evidence of fluid flow in microfractures in geopressed shales [J]. AAPG Bull, 1993, 77(9): 1303-1314.
- [27] LINDGREEN H. Diagenesis and primary migration in Upper Jurassic claystone source rocks in the North Sea [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1985, 69(4): 525-536.
- [28] LEYTHAEUSER D, RUCKHEIM J. Heterogeneity of oil composition within a reservoir as a reflection of accumulation history [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53: 2119-2123.

- Marine Geology Development, 2009, 25(5): 19-24.
- [6] 段威, 侯宇光, 何生, 等. 澳大利亚波拿巴盆地侏罗系烃源岩热史及成熟史模拟[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3): 65-72.
- DUAN Wei, HOU Yu-guang, HE Sheng, et al. Jurassic source rock thermal and maturity history modelling in the Bonaparte Basin of Australia[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(3): 65-72.
- [7] WEST B, MIYAZAKI S. Potential seen on Australia Bonaparte exploration acreage [J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(37): 97-99.
- [8] MIYAZAKI S. Australia's southeastern Bonaparte Basin has plenty of potential[J]. Oil & Gas Journal, 1997, 95(16): 78-81.
- [9] LINDNER A W. Oil and gas developments in Australia in 1989[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 183-200.
- [10] WELTE D H. Petroleum origin and accumulation in basin evolution: a quantitative model[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(8): 1387-1396.
- [11] NAKAYAMA K, VANSICLIN D C. Simulation model for petroleum exploration[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1230-1255.
- [12] BEAUMONT C, BOUTILIER R, MACKENZIE A S. Isomerization and aromatization of hydrocarbons and the paleothermometry and burial history of the Alberta Foreland Basin[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(4): 546-566.
- [13] CAO S, LERCHE I. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of Navarin Basin Cost No. 1 well, Bering Sea, Alaska [J]. Petroleum Geology, 1989, 12(3): 325-352.
- [14] HAGGAS S, MARSHALL E, RHEINBERG P, et al. Offshore exploration and development of the Browse and Bonaparte Basins: a review[J]. APPEA Journal, 2006, 46(1): 666-667.
- [15] 王民, 卢双舫, 董奇, 等. 有机质生烃动力学模型对比[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(3): 12-18.
- WANG Min, LU Shuang-fang, DONG Qi, et al. Comparison on hydrocarbon generation kinetic models [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(3): 12-18.
- [16] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [17] BURNHAM A K, SWEENEY J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(10): 2649-2656.
- [18] 苏玉平, 付晓飞, 卢双舫, 等. EASY% R_o 法在滨北地区热演化史中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(2): 528.
- SU Yu-ping, FU Xiao-fei, LU Shuang-fang, et al. Application of EASY% R_o model to the research of thermal evolution in Binbei[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(2): 528.
- [19] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas system[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [20] WAPLES D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data, and from thermodynamics [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31: 553-575.

(编辑 徐会永)

(上接第16页)

- [29] HUNT J M. Petroleum geology and geochemistry [M]. 2nd ed. San Francisco: Freeman Company, 1996: 743.
- [30] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(6): 471-476.
- HAO Fang, LI Si-tian, GONG Zai-sheng, et al. The mechanics of the diapir and the fluid episodic in filling of Yinggehai Basin [J]. Science in China (Ser D), 2001, 31(6): 471-476.
- [31] 解习农, 李思田, 胡祥云, 等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(3): 247-256.
- XIE Xi-nong, LI Si-tian, HU Xiang-yun, et al. Genetic mechanisms of the diapir and the fluid guide economy in Yinggehai Basin[J]. Science in China (Ser D), 1999, 29(3): 247-256.
- [32] 邹华耀, 周心怀, 鲍晓欢, 等. 渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 885-893.
- ZOU Hua-yao, ZHOU Xin-huai, BAO Xiao-huan, et al. Controlling factors and models for hydrocarbon enrichment/depletion in Paleogene and Neogene, Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 885-893.

(编辑 徐会永)