

渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏

郝芳^{1,2}, 蔡东升³, 邹华耀², 方勇², 曾治平¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 石油大学油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

3. 中海石油研究中心勘探研究部, 河北高碑店 074010

摘要: 渤中坳陷是东营组沉积期及其之后渤海湾盆地沉降—沉积速率最高的地区, 亦是晚期断裂活动最强烈的地区。较高的沉降—沉积速率产生了重要的成藏物质效应: (1) 持续的较快速沉降—沉积使东营组发育较深湖—深湖相泥岩并成熟, 从而使渤中坳陷发育沙河街组和东营组2套有效源岩; (2) 较高的沉降—沉积速率引起的压实不均衡及伴生的源岩快速生烃引起较强的超压, 超压对有机质热演化的抑制作用使沙河街组源岩生、排烃滞后, 从而使沙河街组和东营组在晚期同时保持在较有利的生、排油阶段, 这是渤中坳陷油气资源丰富和油气晚期快速成藏的物质基础。较强的超压和强烈的断裂活动决定了超压—构造活动联控型流体流动, 进而决定了油气幕式快速成藏过程和油气分布。油气主要富集于新近系, 新构造运动控制油气分布。

关键词: 渤中坳陷; 新构造运动; 超压; 幕式流体流动; 油气快速成藏。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2004)05-0518-07

收稿日期: 2004-06-12

Overpressure-Tectonic Activity Controlled Fluid Flow and Rapid Petroleum Accumulation in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin

HAO Fang^{1,2}, CAI Dong-sheng³, ZOU Hua-yao², FANG Yong², ZENG Zhi-ping¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing 102249, China

3. Exploration and Research Department of CNOOC Research Center, Gaobeidian 074010, China

Abstract: Since the beginning of the deposition of Dongying Formation, the Bozhong depression has had the highest subsidence-sedimentation rates and the strongest late-stage (since 5.1 Ma) fault activity in the Bohai Bay basin. High subsidence-sedimentation rates have had very important “material” effects on petroleum accumulation. On one hand, both Dongying and Shahejie formations comprise effective source rocks in the Bozhong depression because of much thick overlying strata, whereas only Shahejie Formation is taken as effective source rocks in almost all other depressions in Bohai Bay basin. On the other hand, strong overpressure caused by compaction disequilibrium due to rapid subsidence and sedimentation retarded organic matter maturation especially hydrocarbon thermal destruction and delayed petroleum expulsion, which made both Shahejie and Dongying formations remain in a favorable conditions for petroleum generation and expulsion during late stage (since 5.1 Ma). The “material effect” is a key for the rapid petroleum accumulation around Bozhong depression. The combination of strong overpressure and strong faulting during late stage controlled fluid flow as a result of episodic petroleum accumulation. Hence, such a process controls the distribution of petroleum occurring in Neogene strata.

Key words: Bozhong depression; neotectonics; overpressure; episodic fluid flow; rapid petroleum accumulation.

近年来,中国海洋石油总公司在环渤中坳陷发现了一系列大、中型油田(龚再升和王国纯,2001),与渤海湾盆地其他地区明显不同.环渤中坳陷油气主要聚集于新近系,油气分布受新构造运动控制(蔡东升和罗毓晖,2001;米立军,2001;龚再升和王国纯,2001)且以快速成藏为特征.盆地流体流动和油气成藏机理是盆地动力学研究的重要内容之一,亦是国际地学界高度重视的跨学科前沿研究领域(李明诚等,2001;刘宝珺和李廷栋,2001).稳态流体流动(即流体通过先存孔隙和/或裂隙连续缓慢渗流)的驱动机制、流动速率和控制因素已得到了广泛研究并取得了重要进展(Sverjensky and Garven, 1992; Garven, 1995),已初步建立了不同构造背景、不同类型盆地中连续稳态流体流动的速率和样式.稳态流体流动是一个连续缓慢的过程,其最大流速通常不超过 $1\sim 10\text{ m/a}$ (Garven, 1995).基于连续稳态流体流动的传统油气成藏理论认为,油气的聚集是一个缓慢过程,大油气田的形成需要数百万年甚至更长的时间,油气的分布受古构造的控制.显然,基于稳态流体流动的传统油气运移、聚集理论难以解释环渤中坳陷油气的成藏与分布.本文将从渤中坳陷的构造活动及其成藏物质效应和成藏能量效应 2 个方面,讨论新构造运动控制下的油气快速成藏机理.

1 渤中坳陷的中晚期构造活动

渤中坳陷是渤海湾盆地完全位于渤海海域的一级构造单元.渤中坳陷的发育演化可以分为早期裂隙—拗陷阶段(孔店组—沙河街组沉积期)、中期裂隙—拗陷阶段(东营组—明化镇组下段沉积期)和晚期构造活化阶段(明化镇组上段—第四系沉积期)等 3 个演化阶段.与渤海湾盆地其他构造单元相比,渤中坳陷中晚期(东营组沉积期以来)构造活动的最重要特征是快速沉降—沉积和强断裂活动.

图 1 是渤海湾盆地主要构造单元凹陷中心的沉降速率对比图.从图中可以看出,各构造单元通常均发育多个相对快速沉降期,反映了多幕裂隙作用.同一时期,不同构造单元的沉降速率存在较大的差异.值得注意的是,自东营组沉积期开始,渤中坳陷一直是渤海湾盆地沉降速率最高的构造单元.东营组沉积期,渤中坳陷的沉降速率超过 500 m/Ma ,辽河坳陷西部凹陷的沉降速率低于 400 m/Ma ,辽河坳陷

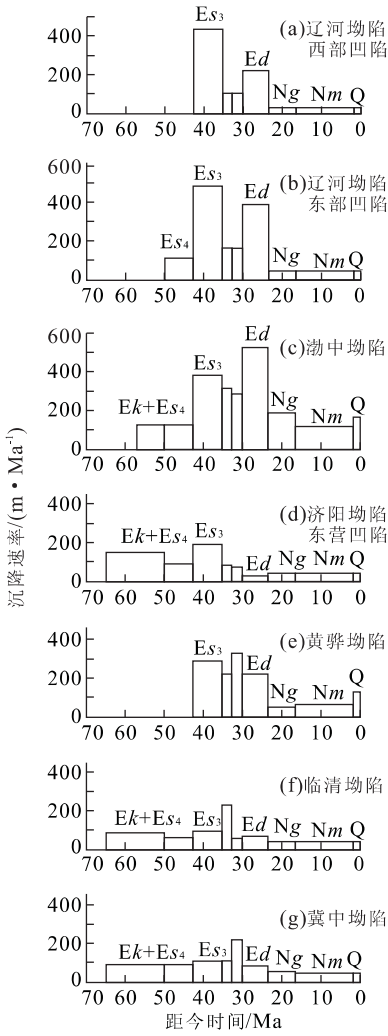


图 1 渤海湾盆地主要构造单元沉降速率的比较(据中海石油研究中心勘探研究部资料编绘)

Fig. 1 Comparison of the subsidence rates for different sub-units of the Bohai Bay basin

东部凹陷和黄骅坳陷的沉降速率为 200 m/Ma 左右,其他大部分地区的沉降速率低于 100 m/Ma (图 1).馆陶组沉积期,渤中坳陷的沉降速率接近 200 m/Ma ,其他构造单元的沉降速率大多低于 $50\sim 80\text{ m/Ma}$ (图 1).在明化镇组沉积期,渤中坳陷的沉降速率高于 100 m/Ma ,其他构造单元的沉降速率大多低于 50 m/Ma .在第四纪,渤中坳陷的沉降速率明显增大(接近 200 m/Ma),黄骅坳陷第四纪的沉降速率亦有所增大,但低于渤中坳陷.渤海湾盆地其他构造单元第四纪的沉降速率通常低于 $50\sim 80\text{ m/Ma}$ (图 1).各个时期不同构造单元沉降速率的对比表明,从东营组沉积期至第四纪,渤中坳陷一直是渤海湾盆地的沉降中心,因此渤中坳陷东营组、新近系及第四系的累积厚度明显超过其他构造单元

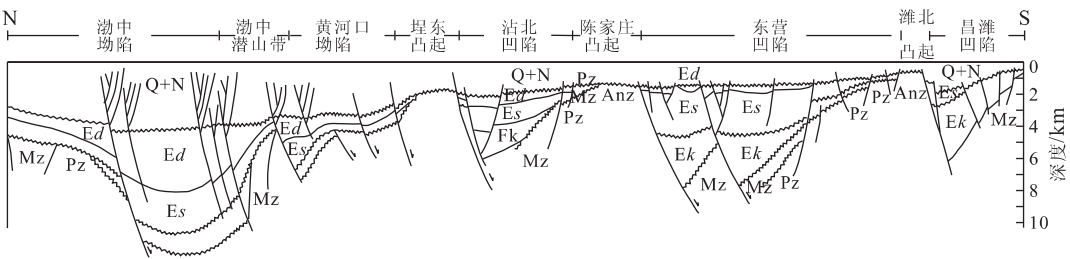


图 2 渤海湾盆地不同地区地层厚度和断裂发育特征的比较(龚再升提供)

Fig. 2 Cross-section showing the difference in stratum thickness and fault features in different sub-units of the Bohai Bay basin

(图 2). 渤中坳陷的长期较快速沉降与板块构造和地壳深部过程密切相关,并对油气的成藏条件和聚集过程具有重要影响。

强烈的断裂活动是渤中坳陷中晚期(东营组沉积期及其之后)构造演化的另一主要特征. 渤中坳陷是渤海湾盆地新近系—第四系断裂密度最高、断裂活动强度最大的地区. 在渤海湾盆地其他构造单元,断裂大多只断至新近系下部,新近系断裂密度低. 而在渤中坳陷,新近系断裂密度高,很多断裂断至第四系(图 2). 新近系—第四系中的断裂以一定的方式与古近系的主干断裂衔接、组合,形成复杂的断裂系统(图 2).

2 中晚期构造活动的成藏物质效应

渤中坳陷中晚期的构造活动,特别是自东营组沉积期以来长期的较快速沉降,对有效源岩的层位和成藏流体的来源具有重要的影响。

(1) 东营组沉积期的快速沉降使渤中坳陷出现半深湖—深湖相环境,发育优质湖相泥岩,而其他凹陷由于沉降速率较低,东营组不发育优质湖相源岩. 渤中坳陷东营组特别是东二下段和东三段的平均总有机碳含量(TOC)均超过 1.0%,并具有较高的氯仿沥青“A”和总烃含量,属于较好的源岩. 东营组特别是东二下段和东三段的热解氢指数(HI)大多介于 300~600 mg/g 之间,表明渤中坳陷东营组发育Ⅱ型甚至Ⅰ型干酪根,进一步证明东营组发育优质湖相源岩。

(2) 东营组沉积期及其之后的快速沉降导致渤中坳陷东营组成熟,成为有效源岩. 图 3 是渤中坳陷 CFD18—2E—1 井有机质成熟度和粘土矿物转化剖面. 从中可以看出,东二上段(E_3d^{2U})的实测镜质体反射率(R_o)已超过 0.5%,热解峰温(T_{max})高于

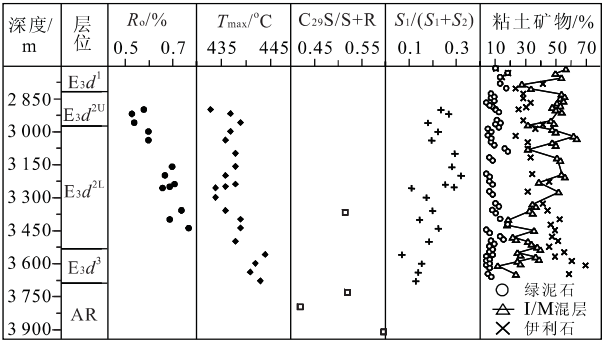


图 3 渤中坳陷 CFD18—2E—1 井有机质成熟度和粘土矿物演化剖面

Fig. 3 Organic matter maturation and clay mineral transformation profiles for Well CFD18-2E-1, Bozhong depression

435℃,已进入生烃门限. 在渤中坳陷,东营组的底面埋深可达 4 000~6 000 m,大部分地区东营组已达到生烃高峰。

综上所述,东营组沉积期及其之后渤中坳陷是渤海湾盆地沉降/沉积速率最高的地区. 较高的沉降/沉积速率产生了重要的成藏物质效应:一方面使渤中坳陷东营组发育深湖—半深湖沉积,从而发育优质湖相泥岩;另一方面使东营组成熟,从而使东营组成为有效源岩. 在渤海湾盆地其他凹陷,主要源岩为沙河街组. 而在渤中坳陷,东营组和沙河街组均为有效源岩,这是渤中坳陷油气异常丰富的最主要原因。

3 中晚期构造活动的能量效应

渤中坳陷的中晚期构造活动将对地下压力和应力状态产生影响,并对流体流动和油气运移产生重要的控制作用,我们称之为能量效应。

3.1 超压的发育

图 4 是渤中坳陷 PL7—1—1 井地层压力和温

度剖面。从图中可以看出:3 650 m 以上为正常压力系统,3 650~3 900 m 为压力过渡带,3 900 m 以下为超压系统,压力系数可达 1.9~2.0。

地震速度和波阻抗分析亦证明,渤中坳陷发育较强的超压,压力系数可达 1.9~2.0。

渤中坳陷较强的超压是快速沉降引起的压实不均衡和生烃作用共同作用的结果 (Osborne and Swarbrick, 1997; Holm, 1998; Magnus, 2001)。自东营组沉积期以来,渤中坳陷一直是渤海湾盆地沉降/沉积速率最大的地区(图 1)。快速沉降/沉积一方面导致压实不均衡,另一方面导致源岩的快速埋藏和快速增温,进而导致源岩快速成熟和快速生烃。压实不均衡和生烃作用都是超压发育的重要机制 (Osborne and Swarbrick, 1997; Holm, 1998; Magnus, 2001),二者的共同作用决定了渤中坳陷发育渤海湾盆地最强的超压。

3.2 超压—构造活动联控型流体流动

20 世纪 90 年代以来,超压的发育机制、超压流体的流动样式和超压环境油气成藏机理成为石油地质学的重要前沿研究领域 (Hunt, 1996; Hao *et al.*, 2000)。Cartwright (1994)和 Garven (1995)等认为,超压流体的排放和流动是离散型的。我们的研究证明:超压流体的排放包括初次排放(流体从超压泥岩向邻近砂岩或其他具有相对高孔隙度/渗透率的地层单元的运移过程)和 2 次排放(流体通过封闭层从超压系统向上覆常压系统或相对低超压系统的运移过程)二个层次 (郝芳和董伟良, 2001),超压流体的初次排放是离散型的,而超压流体的二次排放是汇聚型的 (郝芳等, 2003a)。

较强超压(图 4)、断裂构造发育(图 2)、构造活动强烈是渤中坳陷发育演化的重要特征。在发育断裂的盆地中,超压流体流动受超压和断裂的共同控制,我们称之为断—压双控流体流动。断裂带具有复杂的结构 (Aydin, 2000),断裂带的渗透率通常介于未变形砂岩和泥岩之间。在超压条件下,随着压力的积累,当地层压力超过断裂带的毛细管排替压力但尚未达到地层的破裂压力时,流体通过断裂带发生一定程度的渗流,从而导致超压系统内的流体向断裂带汇聚,因此在断裂带附近,超压界面相对隆起(图 5a)。作为地层破碎带,断裂带的抗张强度明显低于未变形地层的抗张强度,因此断裂的开启压力(p_{TFO})低于未变形地层的水力破裂压力(p_{ff})。随着地层压力的增大,当孔隙流体压力(p_f)达到断裂的

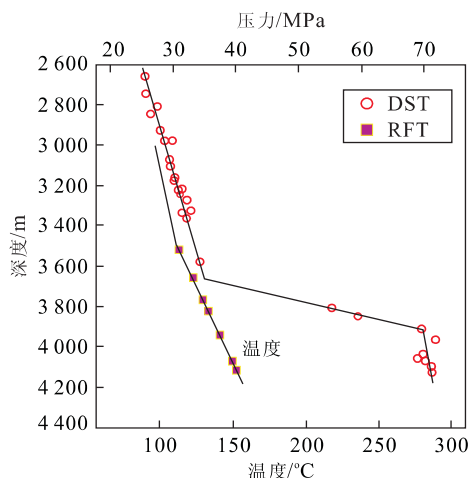


图 4 渤中坳陷 PL7-1-1 井地层温度和压力剖面

Fig. 4 Temperature and pressure profiles for Well PL7-1-1, Bozhong depression

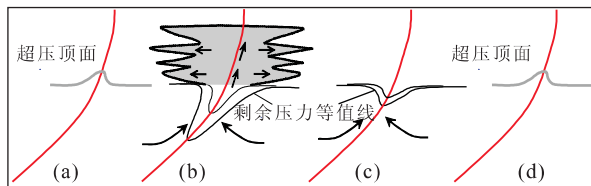


图 5 断裂带压力的积累、断裂开启和流体释放过程

Fig. 5 Schematic diagram showing the processes of the buildup overpressure, opening of the faults and release of overpressure fluid along a fault

开启压力但小于地层的破裂压力(即 $p_f \geq p_{TFO}$, 但 $p_f \leq p_{ff}$)时,断裂及伴生裂隙开启,超压流体释放,同时断裂带附近剩余压力降低,超压系统内流体向断裂带进一步汇聚(图 5b)。随着流体的释放和压力的降低,加之流体运移过程中引起的矿物沉淀,断裂闭合,地层压力逐渐恢复、积累(图 5c)并逐渐恢复到断裂开启前的状态(图 5d),而后流体压力不断积累,再重新引起断裂开启和超压流体排放。

断裂的开启和由此引起的流体流动受多种因素的影响,但可以分为超压主导型、超压—构造活动联控型和突发性构造事件型(图 6)。渤中坳陷发育较强的超压(图 4)和较强烈的构造活动,因此主要发育超压—构造活动联控型流体流动。

4 油气快速成藏机理

近年来,中国海洋石油总公司先后在环渤中地区发现了一系列大中型油田,很多大型油田具有快

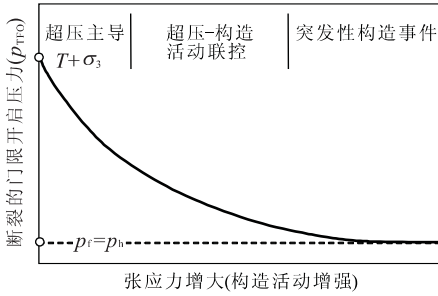


图 6 随张应力增大/构造活动增强,断裂门限开启压力(p_{TFO})的变化

Fig. 6 Variation of the threshold fluid pressure needed for fault opening with increasing tensile stress/strength of tectonic activities

T : 断裂带的抗张强度; σ_3 : 构造松弛状态(应力完全由上覆地层负载产生的理想状态)下的最小水平应力; p_h : 静水压力

速成藏特征. PL19—3 油田圈闭的形成时间不早于 5 Ma,表明有效的油气聚集发生在 5 Ma 以来. 根据该油田的储量,即使不考虑通过断裂的油气散失及生物降解的破坏烃量,该油田的平均原油聚集速率可达 0.328 8 t/d.

4.1 快速成藏的物质基础

东营组沉积期的快速沉降使渤中坳陷东营组发育优质湖相源岩,东营组沉积期及其之后的快速沉降使东营组成熟并进入生烃高峰,从而使其成为有效源岩;另一方面,沙三段沉积期及其之后较快速的沉降(图 1)使渤中坳陷沙河街组发育较强的超压(图 4). 近年来的研究表明,超压是影响有机质热演化和生烃作用的重要因素(Hao *et al.*, 1995; Torre *et al.*, 1997; Hao *et al.*, 1998; McTavish, 1998; Carr, 1999; 郝芳等, 2002; Quick and Tabet, 2003),可以对不同的有机质热演化反应产生不同程度的抑制作用. 在渤中坳陷,超压至少抑制了液态烃的热裂解,从而在常压条件下已进入干气阶段的沙河街组在晚期(5.1 Ma 以来)仍保持在液态窗之内. 换言之,渤中坳陷自沙三段沉积期以来的持续较快速沉降,一方面使东营组成为有效源岩,另一方面使沙河街组源岩生、排烃滞后,从而使东营组和沙河街组源岩同时生、排烃,在晚期同时保持在有利的生、排烃阶段,这是渤中坳陷油气快速成藏的物质基础.

4.2 快速成藏的动力学过程和机理

从图 5,6 中不难看出,超压—构造活动联控型流体流动是一个间歇性(幕式)瞬态流动过程. 由此

决定的油气成藏亦具有幕式特征. 油气成藏由多幕次充注完成,每一幕次又包括稳态汇聚期和瞬态充注期.

稳态汇聚期:断裂处于封闭状态,超压流体的二次排放停止,但超压系统内泥岩特别是烃源岩的天然水力破裂和流体幕式初次排放仍可进行. 进入输导层中的油气在浮力的作用下向断裂带汇聚. 不同盆地甚至同一盆地不同地区,流体的流动样式可以明显不同. 从生烃凹陷向盆地边缘或到目标圈闭,可以出现汇聚型、汇聚—辐射型和离散—辐射型流体流动样式. 汇聚型流体流动样式可汇聚大范围源岩生成的烃类,这是形成大型油气田及油气快速成藏的重要条件之一.

瞬态充注期:超压的积累或超压与构造活动共同作用导致断裂开启,流体(包括油气)向浅层快速充注,而后压力降低,断裂闭合,流体充注终止.

从流体运动学的角度,幕式流体活动的最重要特征是流体流动的不连续性、流体活动过程中温度、压力的快速变化及流体活动的多期次性和周期性(Roberts, 1996; Conybeare and Shaw, 2000; Cosgrove, 2001; Losh *et al.*, 2002). 渤海湾盆地流体包裹体的期次、流体包裹体均一温度及其与储层背景温度的关系证明了深部流体的幕式快速充注. 如图 7 所示, QHD34—2—1 井储层的现今温度为 92 ℃,由于该区基本保持连续沉降,且地温梯度未发生明显的变化,现今储层温度反映了其最高古地温. 储层的流体包裹体均一温度介于 90~170 ℃之间,且可以分为 90~120 ℃、120~150 ℃和 150~170 ℃三组. 流体包裹体均一温度及其与储层温度的关系表明:(1)发育多期流体充注;(2)流体包裹体均一温度明显高于储层背景温度,表明深部流体快速充注进入储层. 多期活动和快速运移均是幕式流体流动的重要标志(郝芳等, 2003b).

4.3 超压—构造活动联控型流体流动与油气分布

超压—构造活动联控型流体流动不仅决定了幕式成藏过程,而且控制了渤中坳陷油气的总体分布规律. (1) 油气主要聚集于新近系. 渤中坳陷贯通古近系和新近系的断层为油气穿层运移提供了有效通道,更重要的是,古近系发育的较强超压为流体(包括油气)通过断层进行较长距离的垂向穿层运移提供了充足的动力,因此,油气更倾向于在新近系聚集. (2) 新构造运动控制油气成藏与分布. 传统的油气成藏理论从圈闭形成与油气运移期匹配的角度,

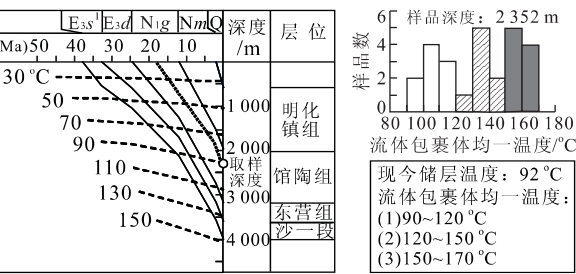


图 7 渤中坳陷 QHD34—2—1 井地层埋藏史、热史及储层流体包裹体均一温度分布

Fig. 7 Burial and thermal histories and homogenization temperatures for fluid inclusions from reservoir of Guantao Formation in Well QHD34-2-1

强调古构造对油气成藏和分布的控制作用。就超压—构造活动共同控制的流体流动和油气成藏而言，由于构造活动的增强可降低断裂开启的门限压力(图 6)，构造活动在油气成藏中起建设性作用，因此构造活动带常常是有利的油气幕式充注场所，新构造运动控制油气分布。

5 结语

与渤海湾盆地其他构造单元相比，渤中坳陷油气聚集的最重要特征包括：(1)油气资源丰富；(2)油气成藏晚，聚集速率高；(3)油气主要富集于新近系，而渤海湾盆地其他地区油气主要富集于古近系；(4)新构造运动控制油气分布。油气分布的上述特征均是渤中坳陷独特的中、晚期构造活动及其成藏物质和能量效应共同作用的结果。渤海湾盆地其他坳陷大多只发育沙河街组源岩。持续的较快速沉降使东营组成为有效源岩，从而使渤中坳陷发育沙河街组和东营组 2 套源岩，这是渤中坳陷油气资源非常丰富的最根本原因。同时，持续的较快速沉降导致渤中坳陷古近系发育较强的超压，而超压抑制了深埋沙河街组源岩的热演化，从而导致沙河街组与东营组在晚期均保持在有利的生、排油阶段，这是渤中坳陷油气快速成藏的重要条件之一。持续的较快速沉降引起的较强超压及 5.1 Ma 以来较强的构造活动控制了流体流动机制和流动样式，进而决定了油气分布特征：较强的超压构成了流体(包括油气)进行较长距离垂向运移的动力，因此油气主要富集于新近系，而构造活动降低了断裂开启和流体(包括油气)垂向运移所需的门限地层压力，因此构造活动在油

气穿层运移过程中起建设性作用，油气倾向于在新近系活动构造带聚集，新构造运动控制油气分布。

References

Aydin, A. , 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 797—814.

Cai, D. S. , Luo, Y. H. , 2001. Shallow tectonic deformation and its relationship to hydrocarbon enrichment in Bozhong depression and adjacent area, Bohai Bay basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(1): 35—43 (in Chinese with English abstract).

Carr, A. D. , 1999. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation. *Marine and Petroleum Geology*, 16(3): 355—377.

Cartwright, J. A. , 1994. Episodic basin-wide fluid expulsion from geopressed shale sequence in the North Sea basin. *Geology*, 22(3): 447—450.

Conybeare, D. M. , Shaw, H. F. , 2000. Fracturing, overpressure release and carbonate cementation in the Everest complex, North Sea. *Clay Minerals*, 35(2): 135—149.

Cosgrove, J. W. , 2001. Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: A factor in the dewatering of low-permeability sediments. *AAPG Bulletin*, 85(4): 737—748.

Garven, G. , 1995. Continental scale groundwater flow and geologic processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 89—117.

Gong, Z. S. , Wang, G. C. , 2001. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 22(2): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Hao, F. , Dong, W. L. , 2001. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).

Hao, F. , Dong, W. L. , Zou, H. Y. , et al. , 2003a. Overpressure fluid flow and rapid natural gas accumulation in the Yinggehai basin. *Acta Petrolei Sinica*, 24(6): 7—12 (in Chinese with English abstract).

Hao, F. , Li, S. T. , Dong, W. L. , et al. , 1998. Abnormal organic matter maturation in the Yinggehai basin, offshore South China Sea: Implications for hydrocarbon expulsion and fluid migration from overpressured systems. *Journal of Petroleum Geology*, 21(4): 427—444.

Hao, F. , Li, S. T. , Gong, Z. S. , et al. , 2000. Thermal regime, inter-reservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang gas field,

- Yinggehai basin, South China Sea: Evidence for episodic fluid injections in overpressured basins? *AAPG Bulletin*, 84(5): 607—626.
- Hao, F., Sun, Y. C., Li, S. T., et al., 1995. Overpressure retardation of organic-matter maturation and hydrocarbon generation: A case study from the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea. *AAPG Bulletin*, 79(4): 551—562.
- Hao, F., Zou, H. Y., Yang, X. S., et al., 2003b. Episodic petroleum accumulation, its driving mechanisms and distinguishing markers. *Chinese Journal of Geology*, 38(3): 403—412 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Ni, J. H., et al., 2002. Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 610—615 (in Chinese with English abstract).
- Holm, G., 1998. How abnormal pressures affect hydrocarbon exploration, exploitation. *Oil & Gas Journal*, 96: 79—84.
- Hunt, J. M., 1996. Petroleum geology and geochemistry. 2nd edition. Freeman Company, San Francisco, 743.
- Li, M. C., Li, J., Wan, Y. J., 2001. Fluids in the sedimentary basins. *Acta Petrolei Sinica*, 22(4): 13—18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Li, T. D., 2001. Some problems of geology. *Advance in Earth Sciences*, 16(5): 607—616 (in Chinese with English abstract).
- Losh, S., Walter, L., Meulbroek, P., et al., 2002. Reservoir fluids and their migration into the South Eugene Island Block 330 reservoirs, offshore Louisiana. *AAPG Bulletin*, 86(8): 1463—1488.
- Magnus, W., 2001. A quantitative comparison of some mechanisms generating overpressure in sedimentary basins. *Tectonophysics*, 334(3): 211—235.
- McTavish, R. A., 1998. The role of overpressure in the retardation of organic matter maturation. *Journal of Petroleum Geology*, 21: 153—186.
- Mi, L. J., 2001. The neotectonism and major Neogene oil and gas fields in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(1): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation. *AAPG Bulletin*, 81(6): 1023—1041.
- Quick, J. C., Tabet, D. E., 2003. Suppressed vitrinite reflectance in the Ferron coalbed gas fairway, central Utah: Possible influence of overpressure. *International Journal of Coal Geology*, 56(1): 49—67.
- Roberts, S. J., Nunn, J. A., Cathles, L., et al., 1996. Expulsion of abnormally pressured fluids along faults. *Journal of Geophysical Research*, 101: 28231—28252.
- Sverjensky, A., Garven, G., 1992. Tracing great fluid migrations. *Nature*, 365(9): 481—482.
- Torre, D. M., Mahlmann, R. F., Ernst, W. G., 1997. Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(14): 2921—2928.

附中文参考文献

- 蔡东升, 罗毓晖, 2001. 渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中坳陷及其周围油气富集的关系. *中国海上油气(地质)*, 15(1): 35—43.
- 龚再升, 王国纯, 2001. 渤海新构造运动控制油气晚期成藏. *石油学报*, 22(2): 1—8.
- 郝芳, 董伟良, 2001. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理. *地球科学进展*, 16(1): 79—85.
- 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等, 2003a. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏. *石油学报*, 24(6): 7—12.
- 郝芳, 邹华耀, 杨旭升, 等, 2003b. 油气幕式成藏及其驱动机制和识别标志. *地质科学*, 38(3): 403—412.
- 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等, 2002. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 610—615.
- 李明诚, 李剑, 万玉金, 2001. 沉积盆地中的流体. *石油学报*, 22(4): 13—18.
- 刘宝瑞, 李廷栋, 2001. 地质学的若干问题. *地球科学进展*, 16(5): 607—616.
- 米立军, 2001. 新构造运动与渤海海域新近系大油田. *中国海上油气(地质)*, 15(1): 21—28.