

文章编号: 0253-9985(2009)05-0635-08

断陷盆地陡坡带构造样式与油气聚集 ——以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷陡坡带为例

慕德梁^{1,2}, 孟卫工², 李成¹, 李晓光², 柳锦云², 王占忠²

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;

2. 中国石油天然气股份有限公司 辽河油田公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 通过对渤海湾盆地辽河西部凹陷东部陡坡带构造演化史、陡坡带沉降史和断裂活动强度等构造地质方面的研究, 把陡坡带划分为 3 种构造样式: ①正反转构造样式; ②伸展断裂构造样式; ③“潜山”披覆构造样式。对研究区的演化史进行研究, 分为正反转演化类型和伸展构造演化类型。由陡坡带沉降史研究得出, 本区构造沉降次序是“由北向南”逐渐沉降演化的。对断裂生长指数的定量计算表明, 台安一大洼断裂的不同部位活动强度不同, 大洼地区断裂活动强度最大。在该区部署的赵古 1 井在太古界潜山获得高产油气流。对陡坡带断裂演化史的研究进而分析裂缝发育带是在潜山深部寻找高产油气藏的关键。

关键词: 构造样式; 构造演化; 陡坡带; 断陷盆地; 辽河坳陷

中图分类号: TE121.2; TE122.3 文献标识码: A

Structural style and hydrocarbon accumulation in the steep slope zone of faulted basin

— an example from the western sag of the Liaohe Depression, the Bohai Bay Basin

Mu Deliang^{1,2}, Meng Weigong², Li Cheng¹, Li Xiaoguang², Liu Jinyun², Wang Zhanzhong²

(1. School of Earth Sciences and Engineering Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. Petrochina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: Study of structural evolution, subsidence history and fault activity intensity of the eastern steep slope zone of the western sag in the Liaohe Depression of the Bohai Bay Basin reveals three structural styles: 1) positive inverse structure; 2) extensional fault structure; and 3) buried-hill drape structure. The evolution history of the study area can also be divided into two types: the positive inverse evolution and extensional structural evolution. Study of subsidence history indicates a gradual subsidence from north to south. Quantitative calculation of the fault growth index shows various fault activity intensities in different parts of Taian-Dawa area with the strongest intensity in Dawa. The Well Zhaogu-1 in Dawa tested high oil and gas flows from the Archeozoic buried-hill. It is therefore suggested that a study of fault evolution and a further analysis of fracture distribution are the key to oil and gas discoveries in deep of buried-hill and provide clues to the exploration of buried-hill reservoirs near hydrocarbon kitchen in steep slope zones.

Key words: structure evolution; steep slope zone; structure type; fault depression; Liaohe Depression; Bohai Bay Basin

1 地质背景

断陷盆地是中国东部中生代典型的盆地类

型, 勘探实践表明, 其陡坡带是油气聚集的良好场所。由于陡坡带具有断裂多期活动的特点, 是复式油气藏发育的主要地区, 以往的勘探集中在新生界地层之中, 并发现了规模的油气藏, 断裂活动

收稿日期: 2009-06-08

第一作者简介: 慕德梁(1970—), 男, 高级工程师、博士研究生, 地质综合研究。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重点攻关课题(2001BA605A-08-04)。

控制了油气藏的分布。然而,随着勘探程度的提高,陡坡带潜山具有近油源的特点,潜山的裂缝发育带也是油气聚集的良好场所。因此,研究陡坡带的构造演化对分析其成藏条件,寻找油气高产区块具有重要意义。

中国东部发育的断陷盆地以其平面上呈“箕状”,剖面上呈“断超”结构为主要特征,超覆一侧一般为盆地的缓坡带,断层一侧为陡坡带,是盆地翘倾断陷的结果。辽河拗陷西部凹陷具有断陷盆地的典型特征,古近系地层呈现“东断西超”的特征^[1~3],济阳拗陷的陡坡带构造特征也有类似的特点。相对陡坡带而言,断陷盆地在缓坡带构造活动相对较弱。陡坡带一侧虽然都表现为断层接

触,但是由于断裂活动差异,整个断裂带往往表现面貌迥异的构造格局,控制不同的沉积相带展布,发育的圈闭类型也不尽相同,因此,研究陡坡带的构造样式并对其形成机制进行探讨,对认识整个盆地形成奠定基础,为在低勘探程度的相似盆地陡坡带发现更多油气藏提供借鉴。

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北隅,构造上属于华北板块的东部,东临辽东台隆,西接燕山沉降带,北达内蒙地轴与松辽盆地相望,是中、新生代发育起来的裂谷盆地。新生代辽河拗陷可划分为“三凹三凸”,即西部凹陷、东部凹陷、大民屯凹陷、西部凸起、中央凸起、东部凸起 6 个构造单元(图 1),总体上呈北东向展布^[4,5]。

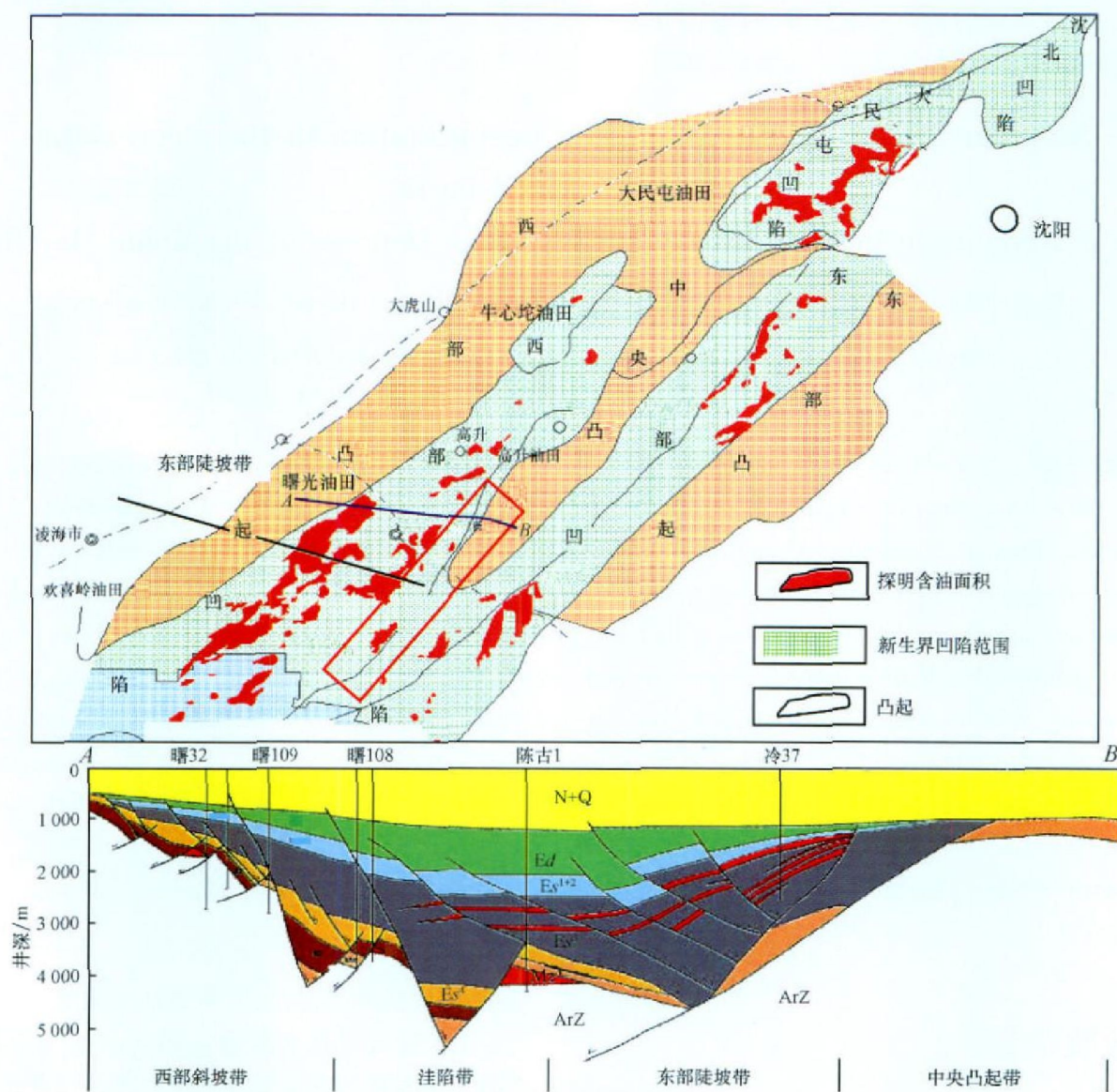


图 1 辽河拗陷西部凹陷构造单元

Fig 1 Tectonic units in the western sag of the Liaohe Depression

N+Q. 新近系 + 平原组; Es^3 . 古近系沙河街组三段; Ed. 古近系东营组;
 Es^4 . 古近系沙河街组四段; Es^{1+2} . 古近系沙河街组一、二段; ArZ. 前震旦系

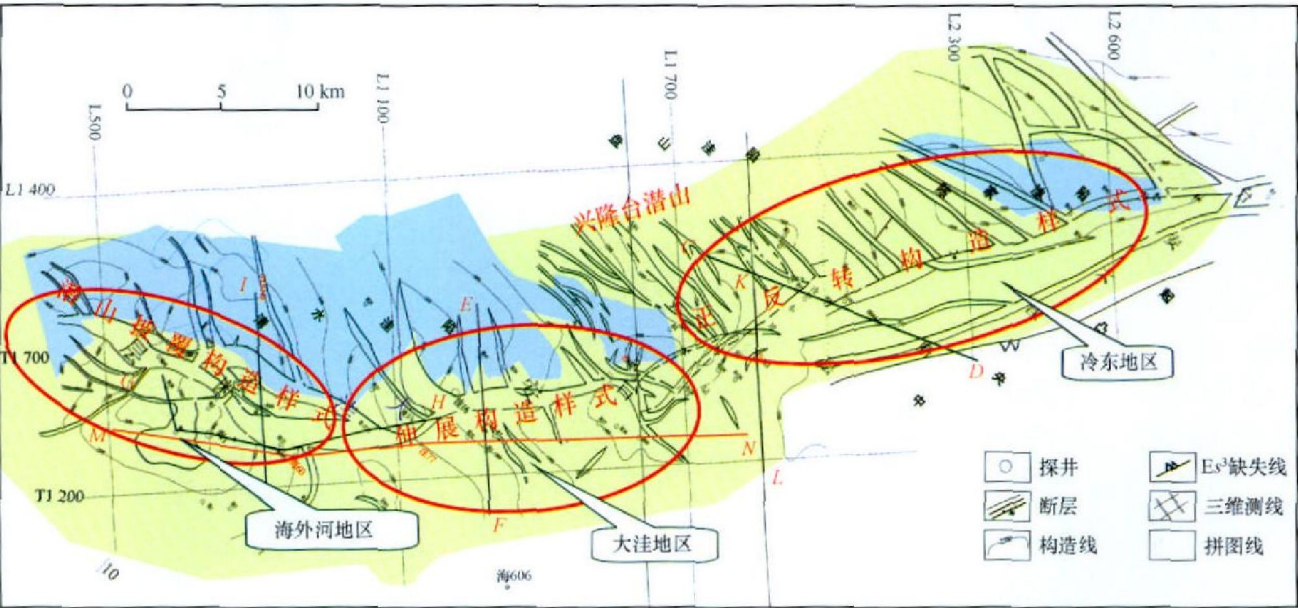


图 2 东部陡坡带构造

Fig. 2 Structure map of the eastern steep slope zone in the western sag of the Liaohe Depression
(拼图线以南为东营组底界, 以北为沙一、二段底界)

研究区位于西部凹陷东部, 包括冷东断裂背斜构造带、大小洼构造带和海外河潜山披覆带 3 个构造单元, 面积 600 km², 构造上属于台安—大洼断裂构造带一部分。该断裂带是新生代郯庐断裂在渤海湾盆地内部活动的分支断层, 它的发育和演化控制了辽河拗陷西部凹陷新生代的发展演化。在该断裂带古近系地层中已经探明 4×10⁸ t 石油地质储量, 近年来在中生界和太古宇潜山地层中也有油气藏发现。因此, 研究该带的构造样式与演化对指导该区和类似盆地陡坡带的勘探有较大的意义 (图 2)。

2 构造样式

构造样式是指一组有着一系列共同特点和规律的构造组合, 这些构造在剖面形态、平面展布、排列、应力机制上, 都有着密切联系^[5]。目前, 国内、外对构造样式研究主要可以分为以下两种: 一种以盆地为单位, 根据断裂与基底的关系, 将前新生界是否卷入变形作为划分构造样式的一级标准, 分为基底卷入型和盖层滑脱型两大类; 另一种是根据盆地的发育历史, 分阶段来划分构造样式, 主要划分思想是现今的盆地构造样式是不同时期的各种类型半地堑复合叠加形成的^[6~11]。本次研究主要以构造演化研究为主线, 贯穿沉积、储层和油气成藏等问题进行探讨。

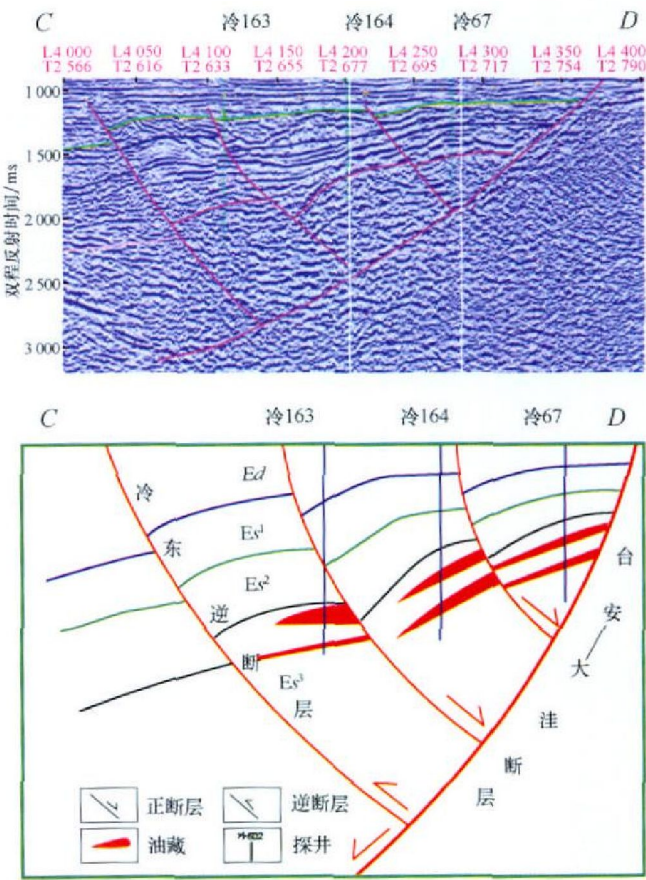


图 3 冷 163—冷 67 联井地震剖面 (上) 和地质结构剖面 (下)

Fig. 3 Seismic section tied to well Leng-163 and well Leng-67 (up) and the geological structural section (down)
(正反转构造样式, 剖面位置见图 2)

根据演化史和断裂活动差异性结合前人的研究成果^[12~15], 本区构造样式应属于“基底卷入型”, 进一步可以分为以下 3 种构造样式: ①冷东

地区的正反转构造样式 (图 3); ②大、小洼地区的伸展构造样式 (图 4); ③海外河地区的“潜山披覆”型构造样式 (图 5)。

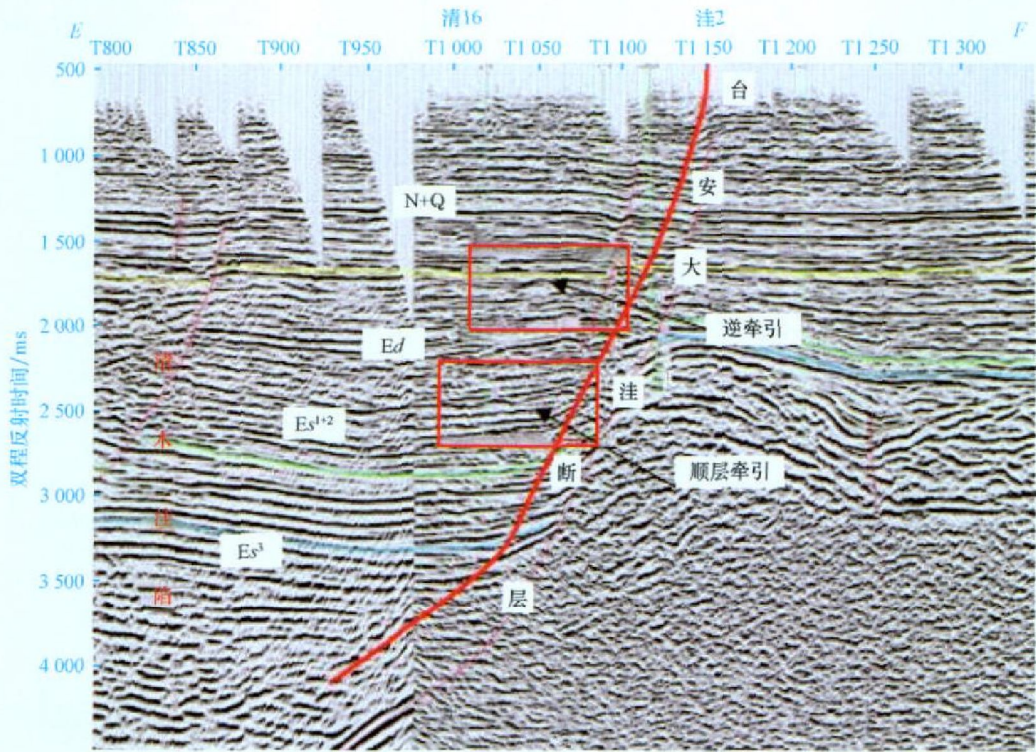


图 4 清 16—洼 2 联井剖面
Fig. 4 Seismic section tied to well Qing-16 and well Wa-2
(伸展构造样式, 剖面位置见图 2)

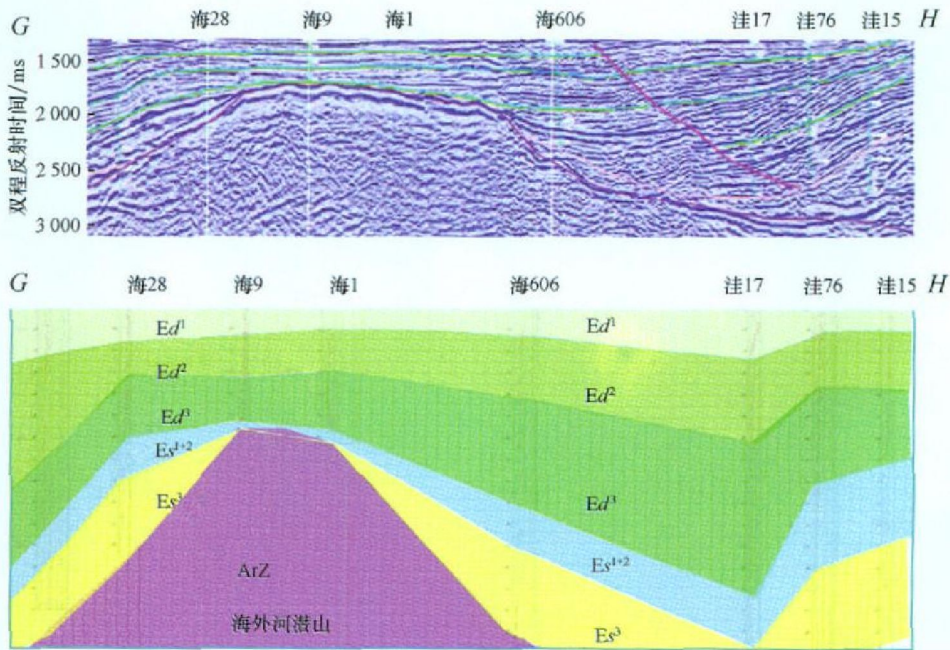


图 5 海 28—洼 15 井联井地震剖面(上)与沉积剖面(下)
Fig. 5 Seismic section tied to well Hai-28 and well Wa-15(up) and the sedimentary section (down)
(潜山披覆构造样式, 剖面位置见图 2)

2.1 正反转构造样式

冷东地区,其东西边界断层分别以北东向展布的冷东逆断层和台安一大洼断裂为界,陈家洼陷位于冷东逆断层的西侧,洼陷内断层以一组“南掉”正断层斜交于冷东正断层,冷东逆断层与台安一大洼断层两条断层之间夹持的古近系东营组(E_d)、沙一段(E_s^1)、沙二段(E_s^2)、沙三段(E_s^3)段地层呈背斜形态(图 2 图 3)。

2.2 伸展构造样式

大洼地区,位于 3 种构造样式的中间位置。以台安一大洼断层为“中心”分为东西两种构造格局,西侧以清水洼陷为构造单元,台安一大洼断层为北东走向,其西侧为一组东西走向的南掉正断层。台安大洼断层上盘的清水洼陷中的东营组、沙一、二段和沙三段地层明显比断层下盘的厚度大,在始新世—渐新世时期,台安大洼断层强烈伸展使得断层上盘空间增大,上盘地层增厚,说明断层是伸展的,由此形成伸展构造样式(图 2 图 4)。

2.3 潜山披覆构造样式

海外河地区,新生界的沉积在基底潜山为背景的基础上发育起来的。平面上台安一大洼断层在此处分呈现北东东向,台安一大洼断层东侧上升盘为一依附于断层的断鼻形态(图 2);剖面上,中生界、沙三段、沙一段地层呈现由四周向顶部超覆,在顶部缺失上述 3 套地层沉积(图 5)。

综上所述,从平面和剖面上都可以看出,东部陡坡带明显分成 3 部分截然不同的构造格局,正反转构造样式以“逆断裂带”的晚期反转为主要特征,而伸展构造样式以“牵引构造”为特点;潜山披覆构造样式以古隆起背景之上地层超覆为主要特征,由北向南依次是正反转构造样式、伸展构造样式和潜山披覆构造样式。

3 演化特征

同处于陡坡带,统一的构造背景下,形成了形态各异的构造样式。同时,断层活动与油气生成、运移和储层裂缝形成具有密切的关系,由于断裂强烈活动在大洼断层一侧深陷形成清水洼陷——

沉积沙三段和沙一、二段沉积巨厚暗色泥岩,作为本区的烃源岩;在断裂强烈活动期油气发生运移,同时脆性岩层发生变形、产生裂缝使得储集性能变好。所以,断裂活动研究是分析油气分布的关键。

3.1 构造发育史

东部陡坡带可以分为大洼—海外河和冷东两种演化类型,大洼—海外河地区构造演化可分为初始裂陷期、深陷期、再陷期和拗陷期 4 个阶段,以持续深陷为典型的特点;而冷东地区演化历史可以分为初始裂陷期、深陷期、走滑反转期和拗陷期 4 个阶段,在前期伸展的基础上叠加了晚期的走滑反转构造为特点^[3]。

3.2 陡坡带沉降史

整个陡坡带的发育和演化受控于台安一大洼断裂带的发育和演化。陡坡带断裂演化是由北向南依次沉降演化的,而不是同时形成的。由洼 77 和海 60 井的沙三段沉积相分析,洼 77 井沙三段中亚段(简称沙三中)下部以粉砂岩夹泥岩为主、上部为泥岩为主,反映洼 77 井区沙三段下亚段(简称沙三下)为扇三角洲前缘、上亚段(简称沙三上)为前三角洲—湖相沉积的特点;海 60 井(2 800 ~3 370 m)沙三段泥岩相当于洼 77 井沙三上地层,缺失沙三下地层,它们都属于水下沉积,从沉积相和地震平行反射可以推断沙三段沉积时古地貌为近似水平的。以上两口井的沉积相带变化在地震剖面上分别对应不同的反射形态,沙三下为高角度平行反射,沙三上为低角度平行反射,两者之间地层呈现约 $3^\circ \sim 5^\circ$ 交角,说明沙三下与沙三上地层沉积时期古地形发生了改变,即北部抬升,南部下降,这种沉降作用一直持续到馆陶时期。

从图 6 可以看出沙三下的高角度平行反射(深灰色)和沙三上的低角度平行反射(浅灰色)之间的角度不整合接触关系。由沙三下高角度平行反射和沙三上低角度平行反射可以看出,在沙三段沉积时期地貌是近水平状,随着构造沉降加大,南部海外河潜山下降的速率大于北部的小洼潜山,因此就形成了沙三段沉积地层南部厚度较大、向北部逐渐减薄、到小洼潜山沙三段地层尖灭。由此得出,本区裂陷成盆是“由北向南”逐渐

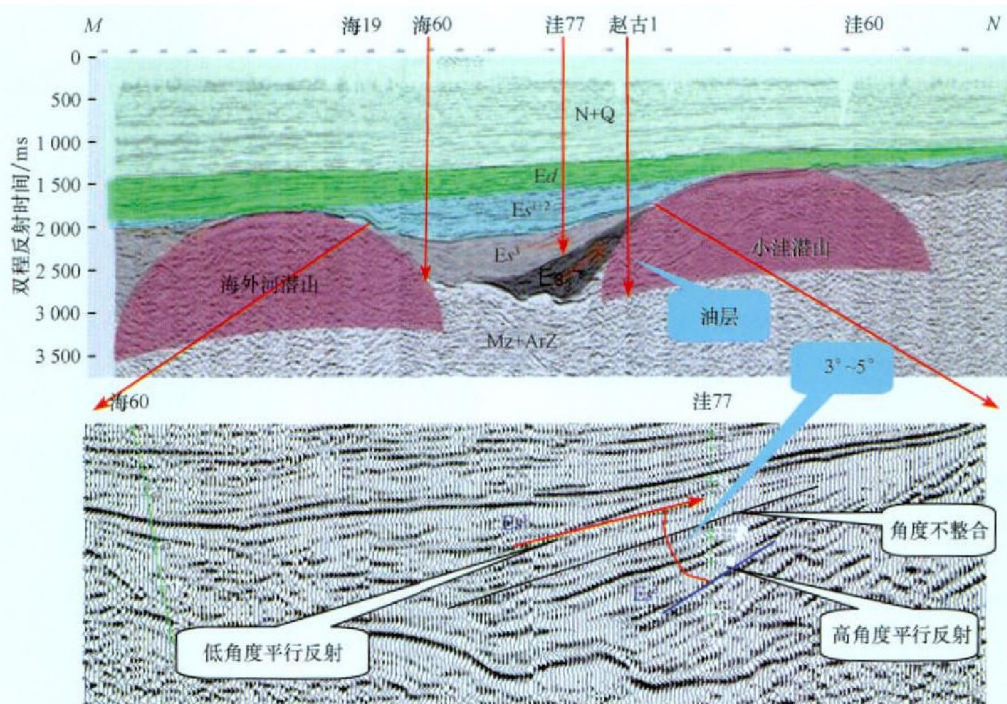


图 6 海 60—洼 77 井地震剖面

Fig 6 The seismic section between well Hai60 and well W a77

(下图是上图海外河与小洼潜山之间放大图;剖面位置见图 2)

沉降演化的,台安—大洼断裂带具有分段差异沉降的性质,符合辽河拗陷“先北后南”的演化格局^[3]。

3.3 断裂活动强度及活动期次

3.3.1 断裂活动强度——生长指数

根据断层的生长指数变化来分析各时期断层活动强度差异性,运用生长指数反映断裂活动的强度是有前提和假设条件的。

1)要假定断裂在水下活动期间,沉积是及时地、完全补偿的,否则沉积厚度不能代表断裂的沉降幅度。但是,实际上沉积补偿原理不是在任何地区、任何层位都适用。它受着沉降速度、物源区的剥蚀速度以及搬运距离等很多因素的影响,因此,在确定上、下盘地层对比单位时大小要适当,不能过小。

2)生长断层上下盘不能有大的沉积间断。

3)生长指数应用得正确与否、精确详细程度,相当大的程度上决定于地层对比的可靠程度和上下盘地层的保存条件。因此要根据上下盘可准确对比的地层单位来确定计算生长指数的地层单位。

4)目前的生长指数分析中没有考虑沉积压

实因素^[3]。

由三维地震资料结合钻井分层,在地震剖面上选取断层较少的剖面,根据井标定,对比该断层面上、下盘的地层,计算断层“生长指数”来分析该断层活动强度和发育时间。生长指数(GI)由下列公式求得:

$$GI = \frac{H_F}{H_L} \quad (1)$$

式中: H_F 为下降盘厚度, m; H_L 为上升盘厚度, m。

由断层的生长指数分析得出:①断层开始发育的时间,即下降盘地层出现厚度增大的最老时代;②断裂运动最强烈时期,即下降盘地层增长最大的时代;③断裂运动的终止时期,即下降盘地层厚度差消失的层位。台安—大洼断层在东营组三期活动强度最大(生长指数最大为 10.5,平均为 6.0),到东营组二期、东营组一期逐渐减弱(生长指数最大为 5.0,平均 3.5),在东营组一亚段沉积时期,有一个断层活动的短暂增强时期,但是活动的强度和幅度远没有东营组三期的强度大。东营组三期在大洼地区沉降速率较大,向南和北部逐渐减小,海外河地区沉降速率最小。

3.3.2 构造活动期次

辽河拗陷为典型的弧后扩张盆地,其构造沉

积演化受控于大地板块俯冲作用和自身盆地形态作用,形成了盆地内部不同部位的不同构造样式,这些构造样式的形成应该是在统一的构造应力场下形成的。即古新世 (53.0 ~ 36.5 Ma) 早期,中国大陆东侧边缘受到太平洋板块向亚洲板块的北西向俯冲作用,本区受东西向拉张作用,裂陷成盆;渐新世 (36.5 ~ 23.0 Ma) 晚期,由于太平洋板块俯冲方向由北西向转变为北北西向^[14],本区应力场由东西向拉张变为挤压^[16],加之辽河拗陷为北东走向的箕状凹陷的边界条件,与东西向挤压应力场形成近 45° 交角,东西向挤压应力沿盆地走向方向分解成一对北东向剪切应力和北西—南东向的挤压应力。

郯庐断裂带在辽河拗陷分为两支,一支是位于东部凹陷的营口—佟二堡断层,另一支是控制西部凹陷东部边界的台安—大洼断层。西部凹陷东部陡坡带构造上属于台安—大洼断裂带,该断裂带是新生代郯庐断裂在渤海湾盆地内部活动的分支断层,它的发育和演化控制了辽河拗陷西部凹陷的整个中、新生代的发育和演化。

本区的构造演化分为两期:始新世早期—渐新世早期 [房身泡 (Ef)—沙一期 (E_s^1)], 大约 63.0 ~ 37.0 Ma 期间为裂谷发育时期;渐新世晚期,大约 36.9 ~ 24.5 Ma 期间,本区进入挤压走滑演化阶段。这种两期次的演化模式对应地震剖面上相应的反射波组特征,由图 4 可以看出,台安—大洼断层倾角较陡 (60° ~ 75°),位于断层上盘的清 16 井地层明显比下盘的洼 2 井地层厚,在断层面附近上盘地层沙一、二段 (2 200 ~ 2 700 ms) 之间地层明显出现“顺层牵引”现象,这是始新世早期—渐新世早期盆地“拉张作用”的表现;在 1 200 ~ 2 000 ms 之间,剖面显示“逆牵引”现象,这是渐新世晚期走滑作用的产物。

由始新世早期到渐新世早期的拉张期,本区主要以张性断层为主,控制了本区的沉积展布;渐新世晚期的走滑期是对本区地层进行“右旋走滑”改造时期,由于“右旋”走滑运动,形成了冷家堡—小洼逆冲断裂背斜构造带的构造样式和大洼—海外河地区的以伸展正断层叠加右旋构造的构造样式,形成“北掉南倾”的断块构造格局 (图 2)。两个阶段产生的构造格局相互叠加构成了本区现今的构造样式。

4 油气成藏条件

4.1 烃源岩条件

始新世早期—渐新世早期的构造活动“拉张”成盆为烃类物质在盆地中聚集提供了空间条件,东部陡坡带紧邻西部凹陷两大生油洼陷—清水洼陷和陈家洼陷 (图 2),烃源岩发育,为本区的油藏形成打下很好的基础。

4.2 油气运聚模式

台安—大洼断层的活动控制本区的油气聚集,洼陷之中烃源岩所生成的油气经横向储层沟通和纵向上断层沟通,在断块、断鼻和背斜等有利圈闭中聚集成藏;由扇三角洲水下河道短轴物源和重力流所形成的砂体,在断层下降盘形成岩性圈闭,在渐新世晚期走滑作用下,形成的“冷东逆断裂”背斜构造带是本区油气最富集的场所,已探明石油地质储量 1.68×10^8 t。

本区的油气藏的形成与本区的构造活动有密切的关系,始新世早期—渐新世早期拉张成盆,沉积大量烃类物质,油气大量生成,由生油岩中运移出来至储集层中,完成油气的“初次运移”;渐新世晚期,由于走滑运动,油气沿断裂带在纵向上发生“二次运移”至东营组地层中,在合适的圈闭中聚集成藏,本区东营组油气藏沿断裂带展布就是这个原因。清水、陈家洼陷的油气在构造活动的背景下沿台安—大洼断裂向上运移,在合适的圈闭中聚集成藏,形成了冷东—海外河构造带沿断裂展布的油气分布格局,其中古近系上部的地层相对下部地层来说油藏的密度较大,粘度较高,这种分布形式是油气运聚方式所决定的,即油气是从洼陷之中沿断裂向高部位运移的^[17]。

对陡坡带构造样式和演化特征分析的基础上,得出本区前古近系潜山经历了南北差异沉降作用,对潜山地层形成裂缝型储层具有重要作用。大洼地区为断裂活动的最强烈的地区,所以,潜山内部裂缝带发育,最易形成潜山内幕油气藏。近油源的条件使得洼陷之中烃源岩生成的油气通过断层和不整合面运移至潜山之中,在潜山中聚集成藏。2008 年完钻的赵古 1 井太古宇潜山 3 090 m 进山,完钻深度为 4 259 m,揭露

太古宇地层厚 1 169 m。太古宇潜山岩性主要为混合花岗岩,岩心构造裂缝发育,可见形成 X 剪切解理,测井解释为低产油层。对该井太古宇 3 230 ~ 3 274 m 测试,2 层、44 m 压裂后日产油 35.4 m³,日产气 2 657 m³,从而在距太古界潜山顶面 184 m 深部获得高产油气流。

5 结论

1) 陡坡带是构造演化十分复杂的地区,也是油气富集的地区。冷东构造带和大洼—海外河断裂带两个地区都经历了始新世早期—渐新世早期的裂谷发育的阶段和渐新世晚期的走滑阶段,由于各区的边界条件有所差异,所以形成了 3 种不同的构造样式:①正反转构造样式;②伸展构造样式;③“潜山披覆”型构造样式。

2) 陡坡带一般有先后沉降次序。海外河潜山与小洼潜山带的沉降演化史分析表明,本区裂陷成盆是“由北向南”逐渐沉降演化的。断裂活动强度研究表明,纵向上古近纪东营组三期为断裂活动期最强,到东营组二期、东营组一期逐渐减弱;横向上,东营组三期在大洼地区沉降速率较大,向南和北部逐渐减小,海外河地区沉降速率最小。

3) 古新世早期,受到太平洋板块向亚洲板块的俯冲作用,本区受东西向拉张作用,裂陷成盆;渐新世晚期,由于太平洋板块俯冲方向的改变,本区应力场由东西向拉张变为挤压作用。以上两次方向相反的板块应力作用是该区 3 种构造样式形成的动力因素。

4) 由陡坡带构造样式和沉降史分析,预测了本区潜山带构造沉降和断裂发育情况。大洼地区为断裂活动的最强烈的地区,所以潜山内部裂缝带发育,最易形成潜山内幕油气藏。这有效地指导了陡坡带潜山的勘探。在大洼地区部署的赵古 1 井在太古宇潜山获得高产油气流。太古宇油藏为裂缝性油藏,它对近油源的陡坡带潜山的勘探具有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 谭俊敏,李明娟. 济阳坳陷早古生代层序划分与石油地质条件 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(3): 307 ~ 311
- 2 于兴河,姜辉,李胜利,等. 中国东部中生代陆相断陷盆地沉积充填模式及控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 39 ~ 45
- 3 廖兴明,姚继峰,于天欣,等. 辽河盆地构造演化与油气 [M]. 北京:石油工业出版社, 1996
- 4 慕德梁. 辽河坳陷牛心坨地区中生代火山岩储层特征 [J]. 断块油气田, 2007, 14(4): 1 ~ 4
- 5 王燮培,费琪,张家骅. 石油勘探构造分析 [M]. 北京:中国地质大学出版社, 1990
- 6 艾伦 P A 艾伦 J R. 盆地分析——原理与应用 [M]. 北京:石油工业出版社, 1995
- 7 邱荣华,付代国,万力,泌阳凹陷南部陡坡带油气勘探实例分析 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 605 ~ 609
- 8 胡望水,陈毓遂,肖安成,等. 塔里木西南坳陷构造样式与圈闭发育特征 [J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(6): 26 ~ 30
- 9 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析 [M]. 南京:南京大学出版社, 1997
- 10 胡望水,卫拥军,张自其. 辽河盆地构造样式与圈闭发育特征 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 197 ~ 200
- 11 童亨茂,纪洪勇,宋立忠,等. 伊通地堑构造样式及其油气分布规律 [J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(5): 9 ~ 13
- 12 漆家福,陈发景. 下辽河—辽东湾新生代裂陷盆地的构造解析 [M]. 北京:地质出版社, 1997
- 13 孟卫工,李晓光,刘宝鸿. 辽河坳陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 584 ~ 589
- 14 张庆龙,王良书,解国爱,等. 郯庐断裂带北延及中生代构造体制转换问题的探讨 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 577 ~ 584
- 15 鹿洪友,陈小宏,张如伟. 桩海古潜山裂缝预测的方法研究——以胜利油田桩海地区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 758 ~ 763
- 16 陆克政,漆家福. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式 [M]. 北京:地质出版社, 1997
- 17 慕德梁,柳锦云. 辽河坳陷稠油油藏地质特征及分布规律 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(增刊): 19 ~ 23

(编辑 陈喜禄)