

济阳坳陷垦东走滑断裂构造特征 及其对油气成藏的影响

究 鹏¹, 王六柱^{2,3}, 余朝华⁴, 刘树亮^{2,3}, 吴时国^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国石油天然气勘探开发公司海外研究中心, 北京, 100083)

摘要: 济阳坳陷垦东凸起紧邻郯庐断裂带西支断裂, 走滑活动强烈, 垦东断层南段及其 NE 向的延伸和发育于潜山主体带与东部斜坡带交界处的浅层走滑构造带是研究区内主要的 2 条走滑构造带。通过对贯穿 2 条走滑构造带的地震剖面和时间切片的精细解释, 以及对走滑构造平面和剖面上不同的几何学特征的分析, 将研究区内的走滑构造分为成熟型和隐伏型 2 种。在对走滑构造特征分析的基础上, 结合研究区内的油气分布和成藏特征, 进一步探讨了不同时期的走滑活动对研究区内的油源、油气运移和输导、油气藏的形成和保存等方面的影响。

关键词: 垦东凸起; 济阳坳陷; 走滑断裂; 油气成藏

中图分类号: TE122.3⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2009)01-0100-08

1 区域地质背景

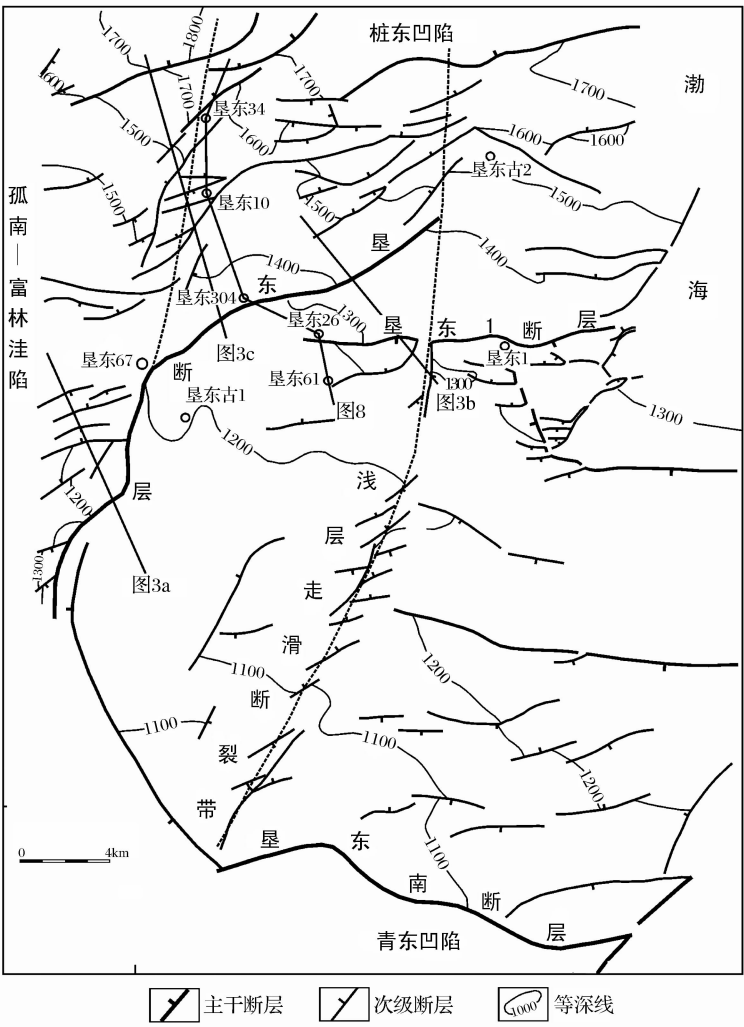
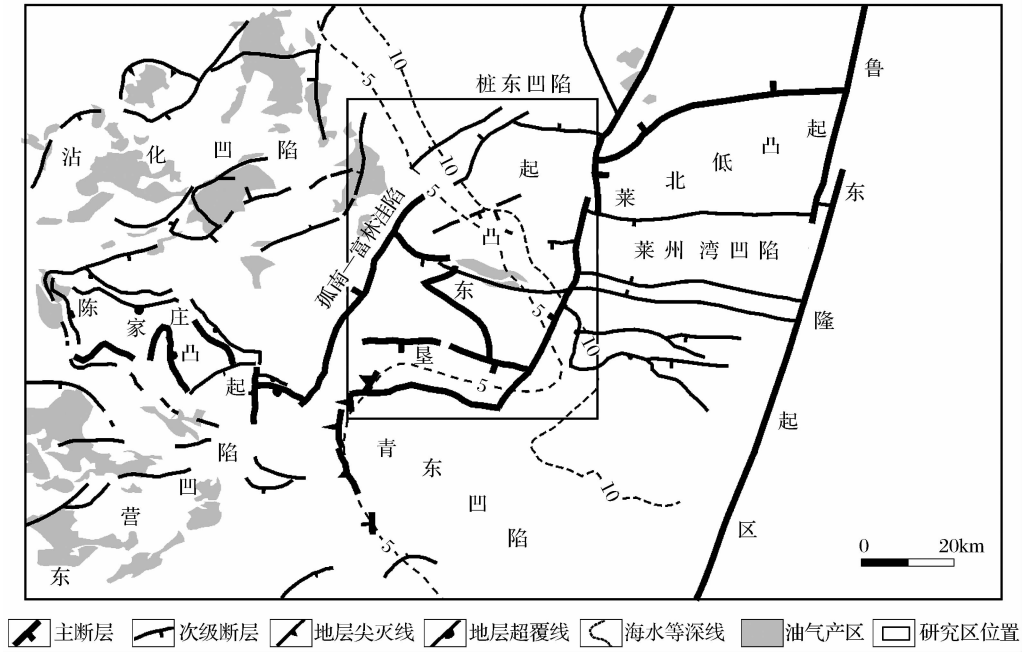
垦东凸起位于济阳坳陷沾化凹陷的东部, 黄河入海口周围的海陆过渡带, 除西南部为陆滩外, 其他部分均为 0~15 m 的浅海水域, 整体呈平行四边形, 面积约 1 200 km²。从构造上来说, 垦东凸起邻近郯庐断裂带中段西分支的西缘, 是夹持于孤南—富林洼陷、桩东凹陷、莱州湾凹陷和青东凹陷间的隆起区域, 其南部通过近东西向的垦东南断层与青东凹陷相接, 西部通过北东走向的垦东断层与孤南—富林洼陷相连, 东部通过莱西断层与莱州湾凹陷相接, 北部以斜坡带深入桩东凹陷(图 1)。

垦东凸起是一个在前古近系潜山背景下发育起来的古近系超覆、新近系披覆的高潜山披覆构造带, 主要发育 NWW 向、SN—NNE 向、NEE 向 3 组断裂体系, 控制了垦东凸起各层系的构造格局^[1-2]。根据钻井资料分析, 垦东凸起钻遇地层从下至上依次为古生界、中生界、古近系、新近系和第四系。古生界分布范围较小, 只在西南部有井钻遇; 中生界分布

于垦东凸起的大部分地区; 由于新生代早期和晚渐新世东营末期的 2 次区域性抬升, 垦东凸起古近系遭受严重剥蚀, 研究区内普遍缺失古近系沙河街组一段以下地层, 古近系东营组一段也被剥蚀殆尽; 新近系披覆全区沉积, 其中, 新近系馆陶组下段沉积明显受古地形控制, 充填于古地形低洼处, 形成厚薄相间的分布格局, 而新近系馆陶组上段沉积受古地形控制较小, 具有从南向北, 由西向东逐渐变厚的趋势; 第四系平原组全区稳定分布^[3]。

2 走滑构造特征分析

郯庐断裂是中国东部一条重要的构造行迹, 其形成和发展演化过程对于中国东部乃至整个亚洲大陆的构造演化都起着至关重要的作用^[4-6]。由于垦东凸起紧邻郯庐断裂带, 其形成和演化在很大程度上受到了郯庐断裂带的影响和控制, 受郯庐断裂走滑活动的影响, 垦东凸起走滑活动强烈, 走滑构造成为该区最主要的构造样式^[7-9]。垦东断层和位于潜山主体带与东部斜坡带之间的浅层走滑构造带是研究区最重要的走滑断裂带(图 2)。



2.1 垦东断层

垦东断层是垦东凸起与孤南—富林洼陷的分界断层(图 2)。垦东断层直线延伸,整体走向为 NNE 向,以垦东古 1 井—垦东 67 井连线为界可分为南北 2 段,南段断层走向 NNE,北段转变成 NEE。在

剖面上,垦东断层表现为一条陡峭的深大断裂,断层面倾角介于 $65^{\circ}\sim75^{\circ}$ 之间(图 3a、图 3b)。另一方面垦东断层的切割深度大,切割了从太古代到新生代各个不同时期形成的地层,在剖面上可以一直延伸到 3.5 s 以下(图 3),转换成深度超过 5.2 km。

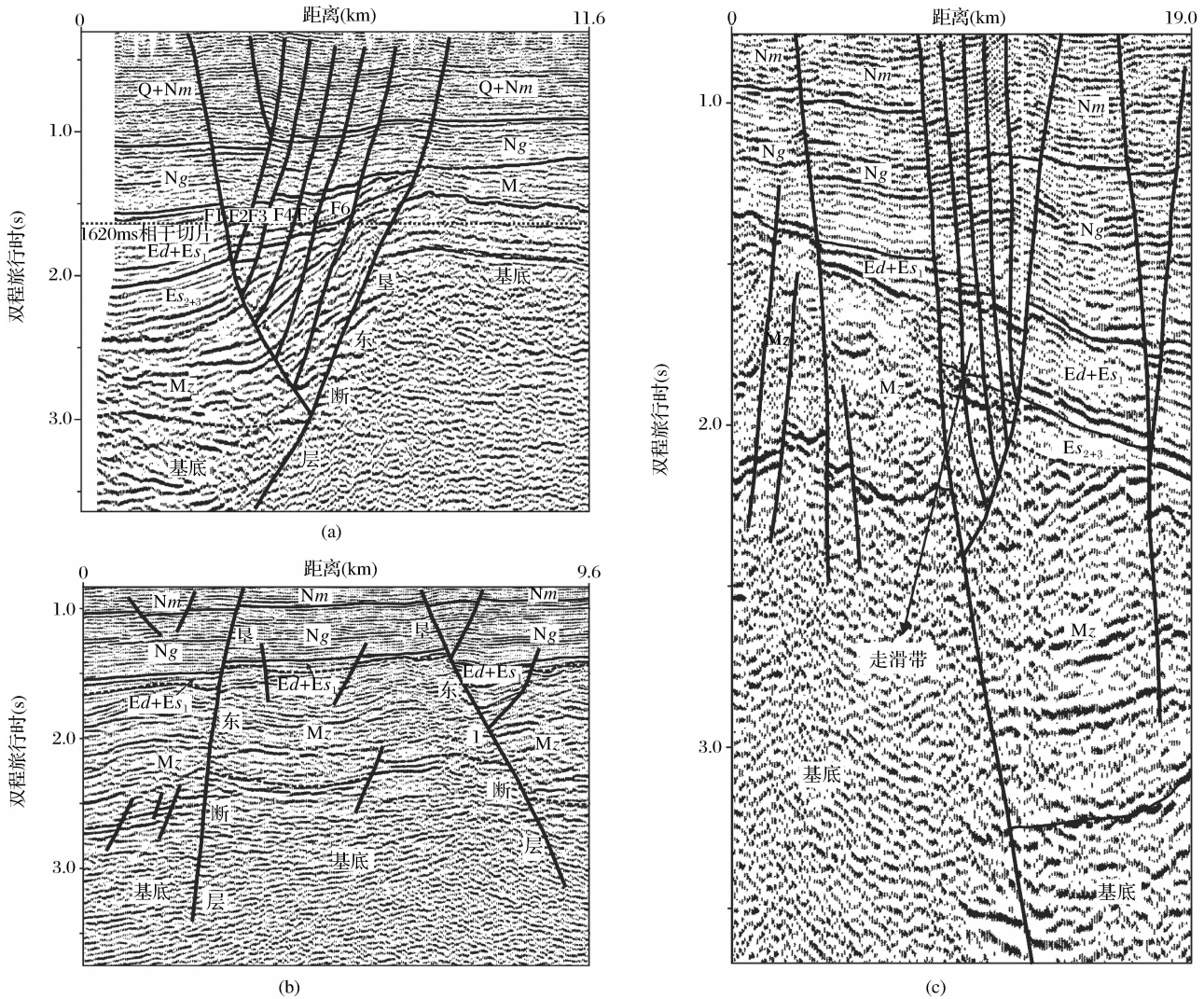


图 3 过垦东断层典型地震剖面(相关测线位置见图 2)

(a) 切过垦东断层南段的地震剖面;(b)切过垦东断层北段的地震剖面;(c)切过垦东断层南段 NE 向延长线的地震剖面

在垦东断层南段的新生代地层中发育明显的负花状构造(图 3a)。剖面上发育的花状构造一直是我们识别走滑断层的一个重要的标志^[10],加之垦东凸起邻近庐走滑断裂带,负花状构造的发育说明了垦东断层南段的走滑断层性质,另一方面,根据前人对负花状构造形成的力学机制的探讨^[11],新生代地层中负花状构造的发育也反映了研究区内新生代以来总体上呈走滑拉张的应力环境。

从切过垦东断层南段的相干切片来看(图 4a),切片上,垦东断层是一条明显的相关系数很低的暗色条带,呈直线状向 NE 方向延伸。此外,在垦东断层附近还发育一系列 NEE 走向,相互平行的伴生雁行正断层,该组正断层发育在新生代地层中,通过与切过垦东断层南段的地震剖面对比发现,平面上呈雁行排列的这组断裂正是剖面上形成花状构造的各分支断裂(图 3a 和图 4b)。雁行断层一直以来也是我们鉴别走滑断层的另一个重要标志^[12-13],雁行断层的出现从另一个方面应证了垦东断层南段的走滑性质。同时,由于该组雁行正断层与垦东走滑断层约呈 45° 角斜交,刚好符合在右旋走滑应力作用下形成的主走滑带与伴生雁行正断层的几何学关系(图 4c),这也说明了研究区内新生代的走滑活动主要是右旋性质的。

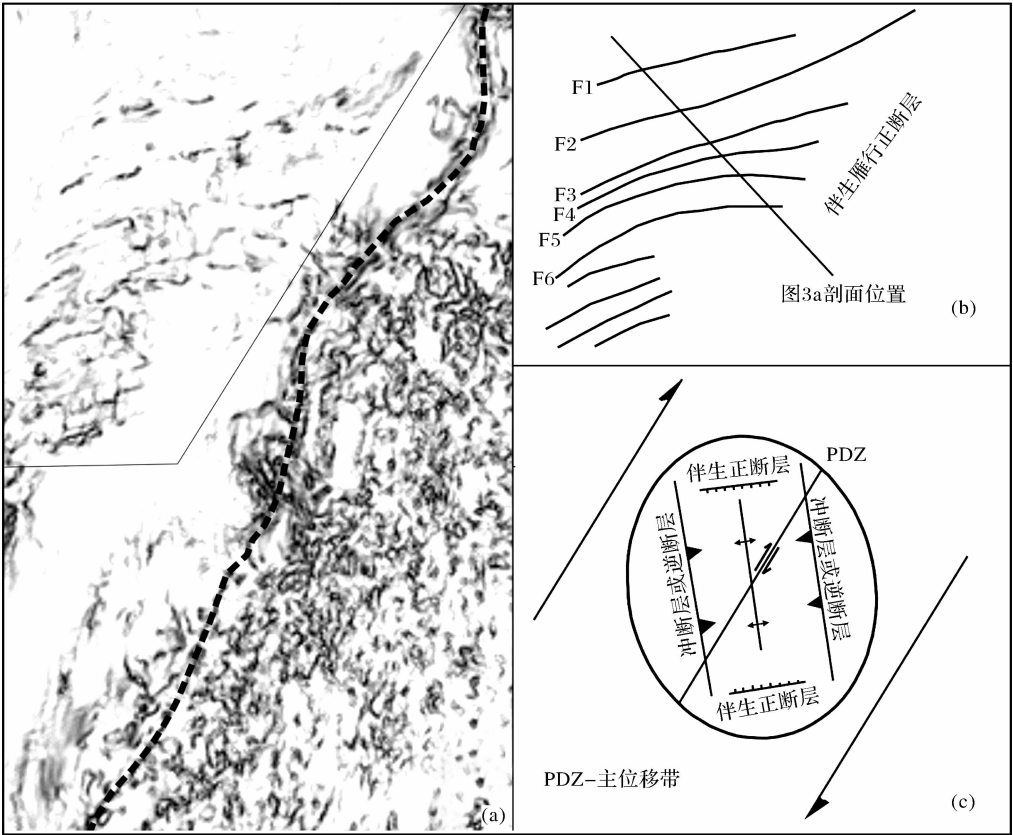


图 4 垦东凸起主走滑带及其伴生构造
(a) 切过垦东断层南段的 1 620 ms 相干切片;(b) 选定区域的解释平面图;(c) 右行走滑应变椭圆

垦东断层的南段表现出走滑断层的性质,而北段断层在剖面上表现为正断层性质(图 3b)。从垦东断层南段的主走滑带与伴生雁行正断层的相互位置关系得到一些启示,可以帮助来推测垦东断层南段和中段表现出走滑断层的性质而北段表现为正断层的原因:垦东断层的南段和北段在形成的最初可能是 2 条独立的断层,南段位于主干走滑位移带内,北段最初是南段走滑断层形成的规模较大的伴生正断层,随着走滑运动的持续发展,2 段断层不断扩大加深并最终连通成为一体,形成垦东断层今天的形态,而垦东走滑位移带的主体部分则向 NE 方向延伸进入渤海,在垦东断层南段向 NE 延伸的方向上,发现了明显的走滑迹象(图 3c),由此可见垦东走滑断裂带是沿 NE 方向直线延伸的。

2.2 垦东浅层走滑断裂带

在垦东凸起,除了垦东断层具有走滑断层性质外,在垦东潜山主体带与东部反向构造带的交接区域还发育一条隐伏的浅层走滑断裂带(图 2)。由于该处的古近系都已被剥蚀殆尽,断裂带的活动主要发生在新近系中。

从新近系馆陶组底构造图和切过该走滑断裂带

的时间切片可以看出(图 2 和图 5),这条隐伏的走滑断裂带并不是贯通的,而是由若干条 NE 走向,相互之间大致平行的断裂组成,这些断裂一般延伸不远,断裂之间被一组 NEE 走向的断裂所切割,形成一条狭长的“羽状”构造带。对比垦东断层的研究结果可以看出,这一组 NEE 向的雁列式正断层也是

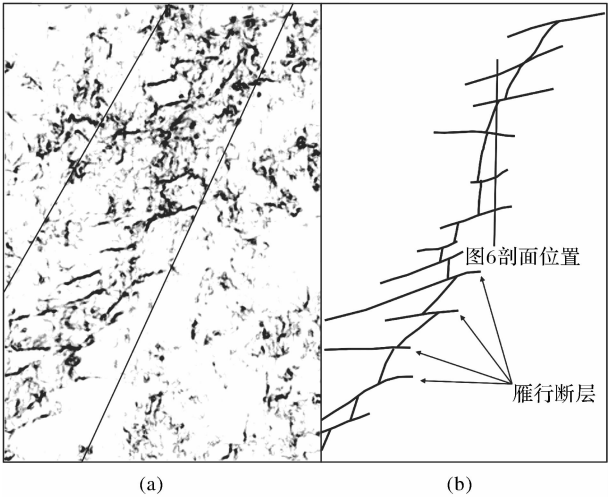


图 5 垦东凸起主走滑带及其伴生构造
(a) 切过垦东浅层走滑断裂带的 850 ms 相干切片;
(b) 选定区域的解释平面图

发育在隐伏走滑断层附近的伴生构造之一。

在剖面上,浅层隐伏走滑断裂带也发育有负花状构造(图 6),这些花状构造发育在新近系中,以新生界底的不整合面为底界,这也是笔者把这一条 NE 向延伸的“羽状”构造带看作是走滑断裂带的主

要原因。同样,对比对垦东断层的研究成果,这些剖面上的花状构造实际上是平面上雁行排列的伴生正断层的剖面表现形式。浅层走滑构造带在研究区内延伸较长,向北越过垦东 1 断层和垦东断层的北段后,通过北部斜坡带进入桩东凹陷(图 2)。

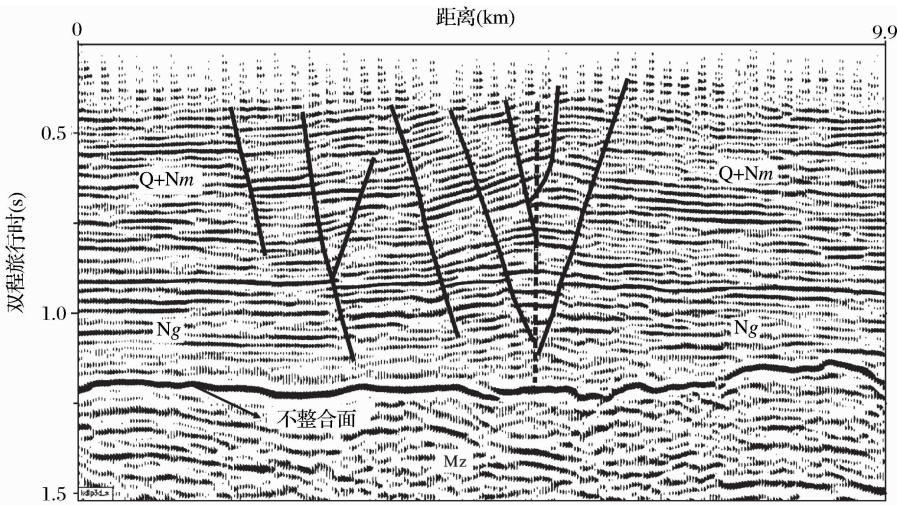

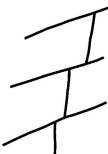
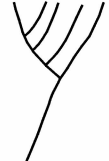



图 6 垦东凸起浅层走滑断裂带发育的负花状构造(剖面位置见图 5)

2.3 走滑构造分类

根据垦东凸起走滑断裂及其伴生构造的平面和剖面的几何学特征,我们可以将研究区内的走滑构造分成 2 种类型(表 1)。

表 1 研究区走滑构造几何形态分类

	成熟型	隐伏型
平面特征	 “入”字型	 羽状
剖面特征	 “有根”型花状构造	 “无根”型花状构造

第一种是成熟的走滑构造带,在研究区内主要指的是垦东断层南段及其 NE 向的延伸部分。这种走滑构造带最早由池英柳等^[13]提出的,这种走滑断裂及其伴生构造在平面上的构造样式往往呈“入”字型。平面上,主干走滑断裂清晰可见,成为“入”字的主要分支,伴生断层与主走滑断裂呈锐角斜交,成为

“入”字的另外一个分支;剖面上,主走滑断裂“有根”,上、下贯通,上面切穿第三系沉积盖层,下面断至基底,主断层面陡峭,伴生的次级断层断至主走滑断层面上,从而在剖面上形成花状构造。

第二种是隐伏的走滑构造,在研究区内主要指的是垦东浅层走滑构造带。也有学者将这类走滑断裂称为不成熟型走滑断裂^[13]。这种走滑断裂并不连通,而是由一系列的平行的断裂组成。平面上,这些断裂彼此平行,呈雁列式分布,彼此之间由调节断层连接,形成“羽状”构造带;剖面上,各断裂主要分布在沉积盖层中,向下收敛于新生界与中生界的不整合面,剖面上并没有主走滑断层的出现,各分支断裂倾向不同,整体形成花状构造。

3 走滑活动对油气成藏的影响

走滑断裂的每一次活动,均形成大量的断层,主干断裂连同其他次级的或者伴生的断裂形成了良好的油气运移输导的通道。如果这种通道的形成在烃源岩大规模生烃高峰之后,断裂的活动和开启就有利于连通深部的烃源岩和位于浅部的储集体,有利于油气从“源”到“汇”的进程,从而有利于油气的富集与成藏。实际上,垦东凸起本身没有生烃能力,但是由于垦东凸起东、南、西 3 面分别以断层与莱州湾

凹陷、青东凹陷和沾化凹陷的孤南洼陷相接,北东方向以斜坡带过渡到桩东凹陷西洼,油气不断从周围4个洼陷中向垦东凸起的高部位运移,形成了4个油气成藏系统:桩东—垦东系统、孤南—垦东系统、青东—垦东系统和莱州湾—垦东系统^[1-2]。

3.1 垦东走滑断裂沟通油源,促进油气向垦东凸起高部位的二次运移成藏

通常来说,由于走滑运动的错动作用,使得沿着大型的成熟的走滑断层两侧,经常发生凹(洼)带与凸起带直接相连的情况发生,分隔沉积凹(洼)陷的走滑大断层的掀斜活动和大距离的垂直断距,导致了在其下降盘沉积物的快速堆积和沉积沉降中心的形成,这些部位逐步成为生油中心,另一方面,这些作为边界断层的走滑断层的长期活动对于凹陷内烃源岩的转化、沟通凹陷内的油源与凸起部位的储层、油气纵向运移都起着至关重要的控制作用。这类断

层的活动时期一般比较长,活动期次较多,长时间的活动使得这类断层的开启性比较好,如果上部位发育盖层封堵,那么这种下部开启,上部封堵的断层就成为油气运移、聚集最理想的模式,具有运聚速度快,不易溢散的特点。研究区内的垦东走滑断裂带正是属于这种性质的断层,它控制和影响了油气从孤南洼陷向垦东凸起的油气运移和成藏。

孤南洼陷的油气主要来源于研究区古近系沙一段和沙三段烃源岩,根据孤南洼陷的埋藏史分析,生烃门限为2 500 m。研究区古近系沙三段烃源岩生烃始于古近系东营组沉积的早期,新近系馆陶组沉积末期和明化镇组沉积时期为大规模排烃期,古近系沙一段烃源岩的最大排烃期发生在新近系明化镇组和第四系沉积期(图7),总体来说,孤南洼陷的油气运聚具有幕次性,主要是在新近系馆陶组—明化镇组沉积时期大量运聚。

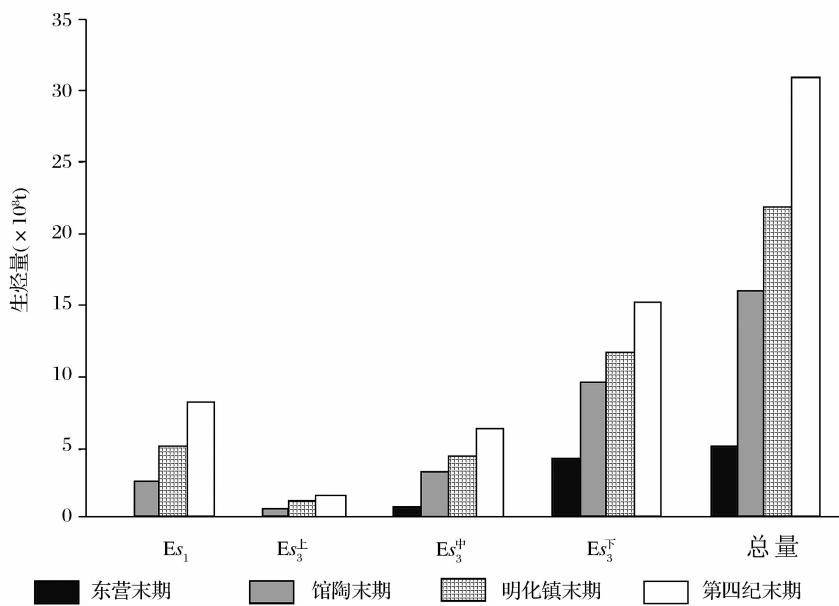


图7 孤南洼陷各层烃源岩不同时期生烃量统计

垦东断层在新生代的活动期比较长,直到新近纪明化镇末期—第四纪初才停止活动,在油气运聚的过程中,孤南洼陷产生的油气首先沿着垦东断层向上运移,然后沿着中生界顶的不整合面和馆陶组连通性较好的砂岩向构造高部位运移,并在新近系明化镇组沉积的中、晚期到达垦东凸起,聚集在以新近系馆陶组上段为主的岩性、构造圈闭中,但正是由于到了新近纪明化镇末期垦东断层的停止活动,断层性质由开启转变为封闭,使得孤南—富林洼陷中第四纪生成的大量油气无法继续通过垦东断层向上运移,造成了油气成藏的时期非常短,不

超过5 Ma,运移的距离也近,约为10~20 km,并最终使得孤南—富林洼陷生成的油气仅分布于邻近洼陷的垦东凸起主体带的西部和垦东北部斜坡带的西部地区。

3.2 北部伴生正断层促进桩东凹陷油气向凸起高部位的远距离运移成藏

由于北部斜坡带夹在垦东走滑断裂带与浅层走滑断裂带之间,受新生代右旋走滑拉张作用的影响,在垦东北部斜坡带发育了一系列的近东西走向的伴生正断层(图2),这些断层倾向与地层的倾向一致的顺向断层,剖面上呈阶梯状(图8)。

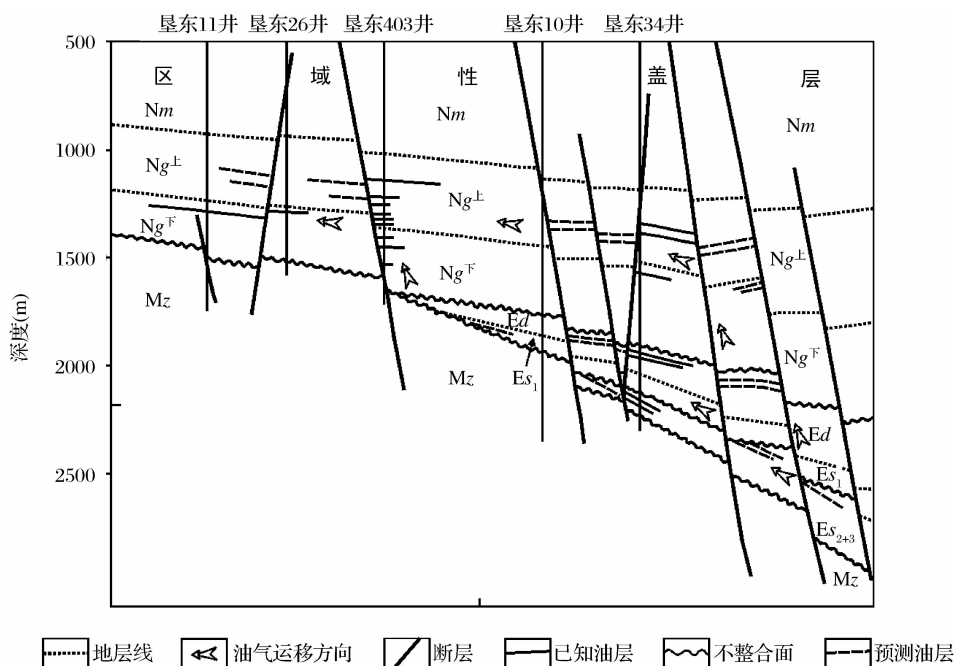


图8 垦东凸起北部斜坡带南北向油藏剖面(剖面位置见图2)

由于这些断层是拉张成因的正断层,断裂的开启性较好,这种阶梯状的正断层成为桩东凹陷的油气向垦东凸起运移的重要通道,使得垦东北部斜坡带、西部潜山主体带的东部和西部斜坡带的油气主要来自于桩东凹陷。

3.3 隐伏型走滑构造形成网毯状运移体系,促进后期生成油气的运移成藏

在前面的走滑构造特征分析一节中,我们提到浅层的走滑构造带在平面上呈“羽状”,剖面上呈花状向上撒开,这样在空间上形成了网毯状结构。同时,从断裂性质上来说这些断裂属于张扭形成的正断层,一般开启性较好,从而有利于油气水平和纵向运移。

浅层的走滑断层形成期为新近系馆陶组—明化镇组沉积时期,而济阳坳陷大规模油气运聚时期亦为该时期,二者相匹配^[14],另一方面,后期活动断裂使得先期通过主干走滑断裂运移到主干走滑断裂带附近的油气向浅层运移提供了运移通道,这使得浅层走滑构造带附近地区油气富集程度高,这也是济阳坳陷东部浅层油气大量富集有利因素之一。

3.4 新近系馆陶组沉积后走滑活动减弱促进了盖层的发育和油气藏的保存

从前面的构造分析中我们可以看到,大多数的走滑断层在馆陶组沉积以后,走滑活动减弱,断裂一般没有延伸进入到明化镇组地层当中。垦东凸起主要发育的盖层是馆陶组上段的I、II、V砂组泥岩和

明化镇组泥岩,在济阳坳陷东部地区,新近系馆陶组—明化镇组泥岩层是一个区域性的盖层,是将油气封盖在下部的最后一道“屏障”,先期很多受构造作用影响而从深部圈闭中溢散出来的油气在向上运移的过程中再次被新近系馆陶组—明化镇组的泥岩封堵,形成次生气藏。

新近系馆陶组—明化镇组泥岩盖层的良好封堵性得益于它们沉积形成的时期刚好是济阳坳陷断陷和郑庐断裂带的走滑活动逐渐减弱的时期,这使得这层盖层没有遭受构造活动的大规模改造而保持了很好的封盖性能。总体上来说,郑庐断裂带走滑活动减弱和休眠与区域性的沉降作用相匹配,为区域性盖层的发育提供良好的构造背景,从而影响和控制着区内盖层的发育。

4 主要结论

(1) 垦东凸起邻近郑庐断裂带中段的西分支的西缘,受郑庐断裂带走滑活动的影响,走滑构造是垦东凸起最为重要的构造样式。垦东断层南段及其向NE方向的延伸和垦东主体潜山带与东部斜坡带中间发育的浅层走滑构造带是研究区内最为重要的2条走滑构造带。

(2) 垦东断层的南段在剖面上发育花状构造,平面上表现为“入”字型结构,花状分支断层实际是垦东断层走滑所伴生的雁行正断层。浅层走滑构造

带主要发育在馆陶组和明化镇组,平面上呈羽状排列,剖面上呈无根型的花状构造,各断层收敛于中生界顶与新生界底部的 T_R 不整合面。

(3) 走滑构造是垦东凸起的重要的含油气构造,走滑活动对垦东凸起的油气成藏起到了非常重要的作用。垦东走滑断裂沟通油源,促进孤南洼陷先期生成油气向垦东凸起高部位的初次运移成藏,但在后期停止活动,性质由开启转而变为封闭,使得孤南—富林洼陷中第四纪生成的大量油气无法继续通过垦东断层向上运移,造成了油气成藏的时期短、运移的距离近。北部斜坡带发育的伴生正断层促进桩东凹陷油气向凸起高部位的远距离运移成藏,隐伏型的浅层走滑构造形成网毯状运移体系,促进后期生成的油气的运移成藏。同时,馆陶组沉积以后,走滑活动减弱促进了盖层的发育和油气藏的保存。

参考文献:

[1] 高月华,杨凤丽,林玉祥. 垦东高凸起成藏动力学系统研究[J]. 海洋石油,2003,23(4):12-18.

[2] 邹东波,吴时国,刘刚,等. 渤海湾盆地桩海地区 NNE 向断层性质及其对油气的影响[J]. 天然气地球科学,2004,15(5):503-507.

[3] 王大华,苏宪锋,魏艳萍. 垦东凸起上第三系油气分布与断层关系研究[J]. 中国海上油气:地质,2003,17(4):232-235.

[4] 徐嘉伟. 郯庐断裂带的平移运动及其地质意义[C]//第 26 届

国际地质大会论文集. 北京:地质出版社,1980:129-142.

[5] Grimmer J C,Jonckheere R,Enkelmann E, *et al.* Cretaceous-Cenozoic history of the Southern Tan-Lu Fault Zone:Apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (Eastern China)[J]. Tectonophysics,2002,359(3):225-253.

[6] Zhang Y Q,Dong S W,Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu Fault Zone in Shangdong Province, Eastern China[J]. Tectonophysics,2003,363:243-258.

[7] Wu S G,Yu Z H,Zhang R Q, *et al.* Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of the Zhuanghai area,Bohai-Bay Basin, East China:Application of balanced cross-sections[J]. Journal of Geophysics and Engineering,2005,2:158-168.

[8] 付兆辉,李敏. 郯庐断裂对垦东地区构造和成藏的影响[J]. 海洋石油,2005,25(2):15-19.

[9] 张克鑫,漆家福,林会喜. 济阳地区埕岛—垦东构造带中生代的逆冲断层及其与郯庐断裂带的关系[J]. 地质科学,2006,41(2):270-277.

[10] 严俊君,王燮增. 关于扭动构造的鉴别问题[J]. 石油与天然气地质,1996,17(1):8-14.

[11] Harding T P. Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive structural inversion [J]. AAPG Bulletin,1985,69:582-600.

[12] Camand J F. Bridge structure as sense of displacement criteria in brittle fault zones[J]. Journal of Structural Geology,1987,9(5):609-620.

[13] 池英柳,赵文智. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集[J]. 石油学报,2000,21(2):14-20.

[14] 刘朝露,夏斌. 济阳拗陷新生代构造演化特征与油气成藏组合模式[J]. 天然气地球科学,2007,18(2):209-214.

Strike-slip Structural Feature and Its Influence on the Hydrocarbon Accumulation in Kendong Area, Jiyang Depression

YAN Peng¹, WANG Liu-zhu^{2,3}, YU Zhao-hua⁴, LIU Shu-liang^{2,3}, WU Shi-guo^{1,2}

(1. College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum (Huadong), Dongying 257061, China;
2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. CNPC International Research Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Kendong area is located close to the west branch fault of Tan-Lu fault zone and strike-slip motion behaves intensely there. The south segment of Kendong fault with its NE extension part and the shallow strike-slip zone between the Kendong buried hill and the east slope are the two important strike-slip zones in the study area. Based on the carefully interpreted seismic sections and time slices across the strike-slip zones, the strike-slip structural feature is further discussed. According to the different geometrical shapes in the horizontal and vertical sections, the strike-slip structure in the study area is divided into two styles: matured strike-slip zone and buried strike-slip zone. Based on the research result of the strike-slip feature in the study area, in combination with the oil and gas distribution and accumulation characteristics, this paper discussed the influence of the strike-slip motion on the reservoir resource, hydrocarbon migration, accumulation and protection at different epochs.

Key words: Strike-slip fault; Hydrocarbon accumulation; Kendong area; Jiyang Depression.