

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.154>



北部湾盆地乌石凹陷东洼伸展滑脱构造发育演化模式及其油气地质意义

王 征^{1,2}, 佟殿君^{1,2*}, 高铭恒^{1,2}, 胡 晨^{1,2}

1. 中国地质大学海洋学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学海洋地质资源湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘 要: 北部湾盆地乌石凹陷从古新世早期到渐新世末期经历了多幕次的伸展, 在裂陷 II 幕时期形成了一组近 E-W 向的伸展滑脱断裂系, 但其形成机制及演化过程尚未明确. 基于油气勘探过程中获取的全新高精度三维地震资料, 应用构造-地层综合解释以及定量分析的技术方法, 对乌石凹陷东洼伸展滑脱构造进行了深入的解析. 结果表明, 乌石东洼新生代地层共发育 7 条近 E-W 或 NE-SW 向展布的伸展滑脱断层 (Fa-Fg), 这些伸展滑脱断层与北倾的 7 号断层相向倾斜发育, 共同控制了流沙港组一段到涠洲组一段的跷跷板式地层沉积和大型滚动背斜的形成. 从演化上来讲, 在始新世早中期 (T100-T83) 盆地为由 NE-SW 向展布的 7 号断层和局部基底小规模正断层控制的地堑或半地堑盆地, 早期局部沉积的流沙港组三段被晚期连续沉积的厚层流沙港组二段油页岩覆盖. 始新世晚期-渐新世晚期 (T83-T60), 盆地沉积了由对倾发育的伸展滑脱断层和 7 号断层共同控制的流沙港组一段-涠洲组一段, 对倾断层的先后活动导致了沉降沉积中心的迁移, 控制了复杂的“跷跷板式”滚动背斜及“包心菜”构造的发育. 新近纪以来 (T60-海底), 盆地的构造活动性减弱, 转变为坳陷型盆地. 描述了乌石凹陷东洼裂陷 II 幕时期形成的伸展滑脱构造的几何学特征, 并解析了伸展滑脱构造的形成模式, 提出了滑脱断裂发育有自下坡断层组向上坡断层组迁移的规律, 对解决油气的运移、储存、保存等问题有重要的意义.

关键词: 北部湾盆地; 乌石凹陷; 伸展滑脱构造; 构造演化; 油气构造; 海洋地质学.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2022)07-2509-12

收稿日期: 2022-04-09

Development of Extensional Decollement Faults and Its Petroleum Implications in Wushi East Subsag, Beibuwan Basin

Wang Zheng^{1,2}, Tong Dianjun^{1,2*}, Gao Mingheng^{1,2}, Hu Chen^{1,2}

1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: From the Early Paleocene to the end of the Oligocene, Wushi Sag of the Beibuwan Basin experienced multiple phases of extension. A group of extensional decollement faults formed during the 2nd phase of rifting, but their formation mechanism and evolution process are not clear. Based on the new high-quality 3-D seismic data obtained in the process of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41830537); 国家自然科学基金面上项目 (No.42172125); 中海石油 (中国) 有限公司湛江分公司项目 (No. CCL2020ZJFN0345).

作者简介: 王征 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事大陆边缘沉积盆地分析等方面研究. ORCID: 0000-0001-5950-5159. E-mail: wang.zheng2.718@foxmail.com

* **通讯作者:** 佟殿君, ORCID:0000-0003-4505-6393. E-mail: djtong@cug.edu.cn

引用格式: 王征, 佟殿君, 高铭恒, 胡晨, 2022. 北部湾盆地乌石凹陷东洼伸展滑脱构造发育演化模式及其油气地质意义. 地球科学, 47(7): 2509-2520.

Citation: Wang Zheng, Tong Dianjun, Gao Mingheng, Hu Chen, 2022. Development of Extensional Decollement Faults and Its Petroleum Implications in Wushi East Subsag, Beibuwan Basin. *Earth Science*, 47(7): 2509-2520.

petroleum exploration, an in-depth analysis of the extensional decollement faults in the Wushi East subsag is conducted in this study. The results show that there are 7 extensional decollement faults (Fa–Fg) in the Wushi East subsag, which are distributed in the near E-W or NE-SW direction. These decollement faults, together with north-dipping No.7 boundary fault, controlled sedimentation from the 1st Member of Liushagang Formation to the 1st Member of Weizhou Formation, which formed a huge rollover anticline. In terms of evolution, during the Early-Middle Eocene, the basin was a graben or half-graben controlled by the NE-SW No.7 boundary fault and other local small basement faults. The 3rd Member of Liushagang Formation strata was discretely distributed and was overlain by thick layer oil shale of the 2nd Member of Liushagang Formation. From the Late Eocene to the Late Oligocene, 1st Member of Liushagang Formation to the 1st Member of Weizhou Formation deposited in the basin, which was controlled by the oppositely dipping extensional decollement faults and the No.7 boundary fault. From the Early Miocene to the present, the basin changed into a sag basin. This study has depicted the geometry of extensional decollement structure which formed during the second episodic rift phase of Wushi East subsag, analyzed the growth and linkage pattern of decollement faults, and proposed the decollement faults upslope-ward migration model, which has a great significance for solving the problems of oil and gas migration, storage and preservation.

Key words: Beibuwan Basin; Wushi Sag; extensional decollement structure; structural evolution; oil and gas structure; marine geology.

0 引言

滑脱构造(decollement)是以一个相对低的岩石强度和剪应变为特征的软弱层为滑脱面(带),其上下盘岩块会发生滑动脱离而形成的一种构造类型,在盆地和造山带内均普遍发育.滑脱构造的概念最开始由 Buxtorf 在 1907 年研究阿尔卑斯山北部的构造时提出(Laubacher, 1988),后在巴西东北部海域盆地(白博等, 2016)、尼日尔三角洲(Fazlikhani and Back, 2015; Fazlikhani *et al.*, 2016)、婆罗洲(Back *et al.*, 2008)、渤海湾盆地南堡凹陷(刘晓峰等, 2010)和歧口凹陷(艾能平等, 2009)等均有报道.滑脱构造根据成因不同可分为伸展滑脱构造和重力滑脱构造.伸展滑脱是在伸展背景下,上覆地层沿着下覆软弱层滑动,一般没有外缘推挤带的出现(艾能平等, 2009).重力滑脱构造是指在重力作用下,由于重力势能降低,地质体发生了后端伸展、中段剪切、前端挤压所形成的一系列构造变形总和(马杏垣和索书田, 1984).

与乌石凹陷东洼(以下简称“乌石东洼”)滑脱构造伴生的有“包心菜”构造和“跷跷板”构造.“包心菜”构造是一类倾向相对的多级断裂向下收敛、向上撒开的构造样式,一般发育在断层下降盘中,因其剖面结构形似“包心菜”而得名.“包心菜”构造具有以下结构特征:(1)形态上来说,其具有凹中隆特有的结构形态,剖面结构形似“包心菜”状;(2)有较多相向而生的断裂,断裂切割地层较多,由老及新各地层都有影响;(3)各断层断距较小且比较平均,并且一般在隆起最高处地层存

在剥蚀(张东东等, 2013).“跷跷板”式构造是在断陷盆地发育演化过程中,由不同构造阶段控制沉积的断层活动性存在的差异所致.“跷跷板”式构造在外部形态上呈现出两个反向楔形的特征,其形成演化受控于不同构造阶段两条倾向相反的张性断层的先后活动,系不同阶段控盆断层发育演化的横向差异所致,区域应力场性质并未发生转变,始终处于伸展的构造背景(刘见宝等, 2010).

本文基于中海石油(中国)有限公司在油气勘探过程中施工的、覆盖乌石东洼的高精度三维地震资料和钻井资料的精细解释和制图,结合前人的研究成果对乌石东洼裂陷期的构造地层进行了深入研究,建立了乌石东洼伸展滑脱构造模式,并通过主滑脱断层活动性进行的定量分析,揭示了其发育演化规律,进而探讨了伸展滑脱构造的油气成藏意义.

1 区域地质背景

乌石凹陷是位于北部湾盆地中部的一个小型凹陷,其南、北两侧分别与企西隆起和流沙低凸起相邻,总面积约 2 680 km²,可以进一步划分为东洼和西洼两个次级构造单元.西洼受控于呈 U 型展布的 6 号断层,表现为北断南超的结构样式;东洼则受控于 7 号断层,具有南断北超的结构样式.在乌石凹陷中部,6 号和 7 号边界断层相互重叠区段对向倾斜共同控制了地堑式洼陷的发育和演化(图 1).

乌石凹陷新生代的地层缺失长流组,从下到上由流沙港组、涠洲组、下洋组、角尾组、灯楼角组和

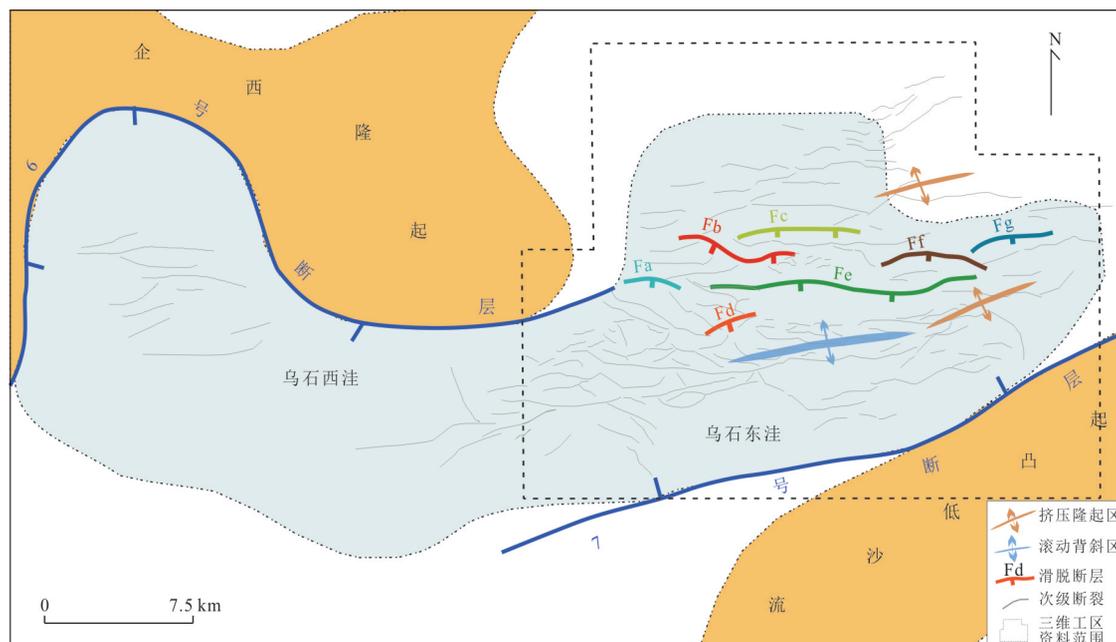


图1 乌石凹陷构造纲要图

Fig.1 Structure map of Wushi sag

望楼港组构成(图2),主要的岩性特征是古新统陆相红色砂泥岩、始新统深湖相油页岩、渐新统三角洲相杂色泥岩、新近系滨浅海相灰色泥岩。乌石东洼沉积有厚层流二段烃源岩塑性层,这层软弱层是乌石东洼伸展滑脱构造发育的前提条件。而乌石西洼则缺乏此套厚层塑性层,主要以渐新统富砂地层为主(胡林等,2021)。

近几年来,乌石凹陷特别是其东洼不断有新的油气发现,使得乌石凹陷继涠西南凹陷之后成为北部湾盆地又一个重要的油气生产基地(徐长贵和范彩伟,2021)。与涠西南凹陷一样,乌石凹陷东洼的主力烃源岩也为流沙港组二段,在东洼这套地层中成熟烃源岩面积约540 km²,厚度为1~2 km,具有良好的烃源条件(杨希冰等,2017)。迄今为止,乌石东洼已经发现了2个油田和3个含油构造(杨希冰等,2017),这些含油构造和油田的形成与伸展滑脱构造具有密切的关系。

2 乌石凹陷构造地层格架

2.1 构造-地层界面与特征

结合国内层序地层划分(李春荣等,2012)和中海石油(中国)有限公司提供的钻井资料,确立了乌石凹陷新生代地层划分方案,并在地震剖面上识别出T100、T86、T83、T80、T72、

T70、T60这7个新生代地层反射界面。

2.1.1 一级构造-层序界面 乌石东洼缺失长流组,流沙港组三段(以下简称“流三段”)底界面T100是新生代地层底界面,为基底反射界面,局部被NE向展布的小型正断层错断,可区域性追踪,代表了早期盆地初始张裂留下的地质记录,是一个一级层序界面(图2,图3)。该期不整合面在整个北部湾盆地表现十分清晰,在地震剖面上表现为强振幅、低频、中连续的地震反射同相轴,不整合面之下为古生界变质岩、中生界花岗岩,表现为明显的杂乱反射特征(图3)。现今海底界面是新生代盆地沉积充填的顶界面,该界面是水/沉积物两种波阻抗不同物质的分界面,在地震剖面成像非常清晰。乌石凹陷沉积物供给充足,且水深较浅,所以该界面在时间域地震剖面上产状水平,并位于大约100 ms(75 m)位置。T100和海底这两个界面控制了新生代盆地充填实体。

下洋组底界面T60是古近系与新近系沉积地层的分界面。界面之下表现为明显的削截,且削截角度大、削截范围广,除少数断裂向上延伸到界面之上,多数都终止于该界面之下(图3)。该界面之上的地震反射轴显示出向北侧上超的反射结构特征,断裂不发育,地层近平行展布(图3)。由此可见,自该界面往上盆地呈现出明显的拗陷特征,为盆地构造体制发生断-拗转换的界面,可称为裂后或破裂

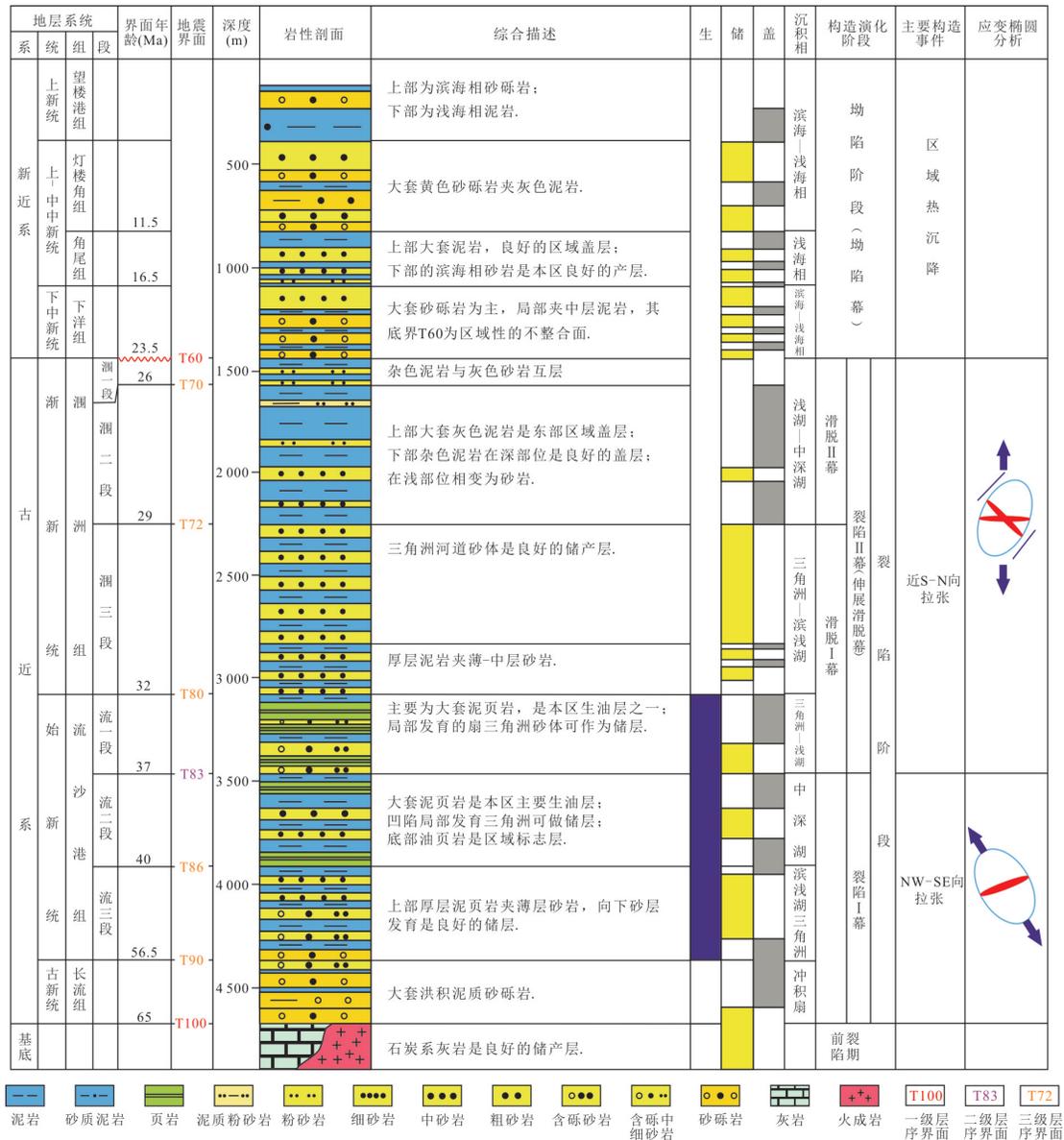


图 2 北部湾盆地地层构造综合柱状图(据李春荣等 (2012)修改)

Fig.2 Summary of strata and tectonic event of Beibuwan Basin(modified from Li *et al.*, 2012)

不整合面,为一级层序界面(任建业等, 2018).

2.1.2 二级构造-层序界面 T83界面为盆地内拉伸构造应力场变革界面,伸展应力从NW-SE向转变为N-S向,为盆地的二级构造界面(图2).地震剖面上表现为低频、中-强连续性、强振幅特征(图3).在T83界面沉积之前,NW-SE向的拉张应力导致北部湾盆地产生了一组NE-SW向的断裂(胡德胜等,2016).在T83界面沉积之后的界面构造图显示断层的走向从NE-SW向转变为近E-W向,表明构造应力旋转为N-S向.同时,T83界面是早-中始新世小型断陷盆地控盆断裂停止活动的界面和晚始新世-渐新世滑脱断层开始活动的分界面(图3).

2.1.3 三级构造-层序界面 三级构造层序界面有T86、T80、T72和T70四个界面.T86界面为流沙港组二段(以下简称“流二段”)底界面,界面的地球物理特征为强振幅、中低频、高连续反射;与T100界面一起限定了流三段.T80界面是盆地内流沙港组与涠洲组分界面,涠洲组上覆于底部流沙港组,未发现典型的角度不整合接触关系;其地球物理特征为中频、中强振幅、高连续反射(图3).T72界面为涠洲组三段(以下简称“涠三段”)和涠洲组二段(以下简称“涠二段”)分界面,剖面上表现为中高频、中连续、中振幅特征(图3).T72界面是区分滑脱I幕和滑脱II幕的重要界面.在T72界面沉积前下坡断

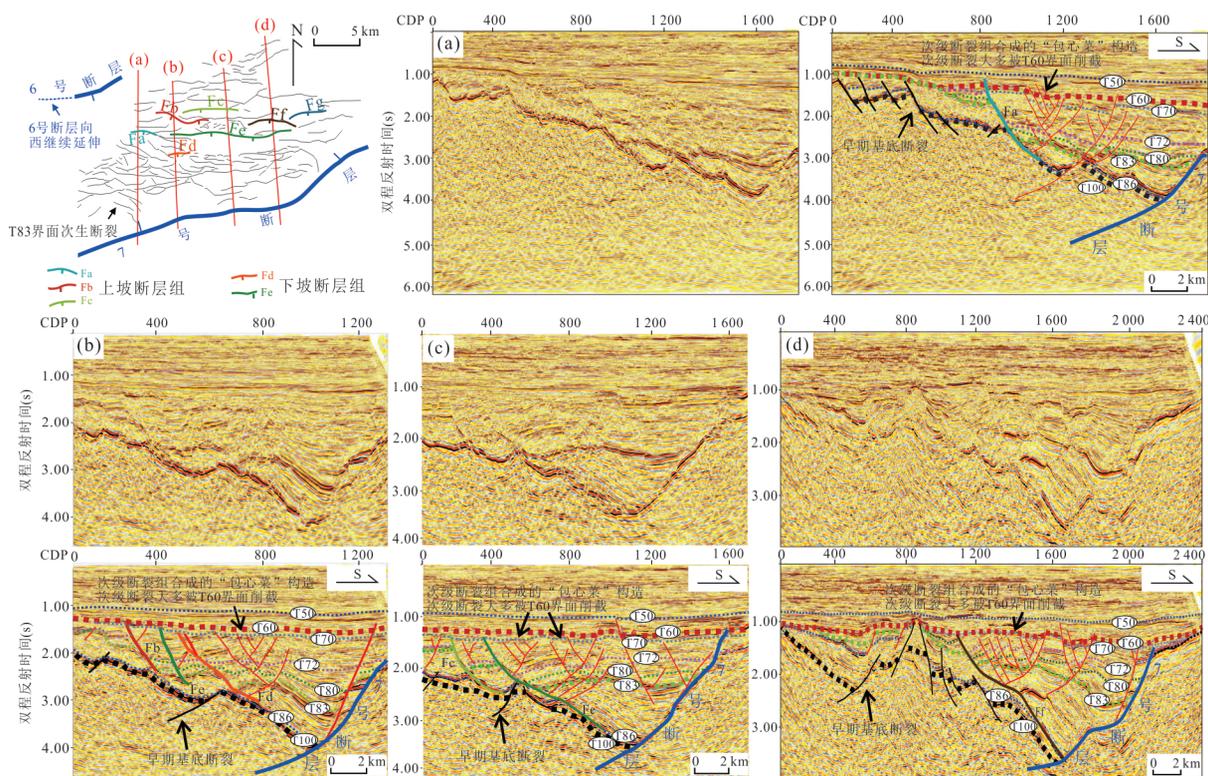


图 3 南北向地震剖面 and 解释

Fig.3 North-south seismic profile and interpretation

层组先活动,在其沉积后上坡断层组开始活动,详见下文描述。T70界面是涠二段和涠洲组一段(以下简称“涠一段”)分界面,地震剖面上表现为高频、中强振幅特征,连续性较好。界面在乌石东洼滚动背斜轴部以及北部缓坡带高部位被T60界面削截。

2.2 构造运动幕次

前文识别出了新生代底界面 T100、下洋组底界面 T60 两个一级构造-层序界面,流一段底界面 T83 一个二级构造-层序界面和 T86、T80、T72、T70 四个三级构造-层序界面。这些界面是构建乌石凹陷新生代构造-地层格架的基本要素。根据北部湾盆地同裂陷构造阶段的区域应力场方向和裂后阶段的盆地原型,将盆地划分裂陷 I 幕(T100-T83)、裂陷 II 幕(T83-T60)和坳陷幕(T60-海底)。根据下坡断层组和上坡断层组的活动时间将裂陷 II 幕进一步划分为滑脱 I 幕(T83-T72)和滑脱 II 幕(T72-T60,图 2)。

2.2.1 裂陷 I 幕(T100-T83) 乌石东洼缺失古新统长流组,其裂陷 I 幕的地层由 T100 界面和 T83 界面所限定的始新统流三段(T100-T86)和流二段(T86-T83)组成,该时期发育的断层主要呈 NE 向展布,代表着区域应力场的方向为 NW-SE 向(胡德

胜等,2016)。流三段由早期小型断陷盆地控制,向小型断陷盆地边界断层发散。除在北坡带东部有较厚沉积外,其余地方沉积厚度较薄(图 3d)。流二段整体表现为楔形,向 7 号断层发散。在地震剖面上呈现弱振幅、低频、高连续性的特征,对应一套深湖-半深湖相页岩、油页岩沉积(图 2,图 3),该层由于其软弱的力学性质作为伸展滑脱断层系的滑脱层。

2.2.2 裂陷 II 幕(伸展滑脱幕, T83-T60) 裂陷 II 幕的地层由 T83 界面和 T60 界面所界定,由流一段(T83-T80)和涠洲组(T80-T60)组成(图 2),该时期的界面构造图中断层主要呈 E-W 向展布(胡德胜等,2016),代表着该时期区域应力场旋转为 N-S 向。流一段在地震剖面呈现中振幅、中频、高连续性的特征,对应一套浅湖相沉积,代表该界面形成时期湖盆范围的萎缩(图 3)。钻井揭示从流二段到流一段沉积相从泥岩、油页岩为主转变为泥岩、砂岩为主(图 2)。流一段和涠洲组总体呈现两个反向楔形组成的“跷跷板”形,在盆地滚动背斜区呈现中间薄、向两侧断层处发散的特征(图 5)。在裂陷 II 幕中又以 T72 界面划分为滑脱 I 幕和滑脱 II 幕。滑脱 I 幕以下坡断层组活跃发育为特征,滑脱 II 幕以上坡断层组活跃发育为特征,详见下文。

2.2.3 坳陷幕(T60-海底) 坳陷幕以 T60 界面和现今海底界面所限定,包括新近系下洋组、角尾组、灯楼角组和望楼港组(图 2)。坳陷幕地层形态为中间厚、向两侧变薄的碟形,向北上超到 T60 界面之上,结构上是一种坳陷型盆地。乌石东洼坳陷幕构造活动微弱,几乎没有断层发育。

3 乌石东洼的伸展滑脱构造特征

3.1 伸展滑脱构造的几何特征

乌石东洼的伸展滑脱构造形成于裂陷 II 幕时期(T83-T60),是东洼北部缓坡带断裂同沉积活动控制下的一套构造系统,由一系列台阶式断陷、沿流二段(T86-T83)软弱的油页岩层滑脱而形成的盆倾断层系及其与主控边界断裂(7号断层)所夹持的复杂的滑脱背斜组成。在整个东洼内共识别出 7 条伸展滑脱断层,这些伸展滑脱断层位于乌石东洼缓坡带中部,平面上为近 EW 向延伸,相互间表现出斜列式展布特征(图 1)。

根据断层平面相对位置关系以及是否被剥蚀可划分为上坡断层组(Upslope Faults,如图 1 中的 Fa-Fc 断裂)、下坡断层组(Downslope Faults,图 1 中的 Fd-Fe 断层)和被剥蚀断层组(Footwall-Eroded Faults,图 1 中的 Ff-Fg 断层)(Jackson and Larsen, 2009)。上坡断层组发育在远离主边界断裂(7号断层)的缓坡带靠近上坡的位置,埋藏浅,远离凹陷的沉积沉降中心;下坡断层组发育在上坡断层组下坡的位置,靠近主边界断裂(7号断层),埋藏深,靠近凹陷的沉积沉降中心;被剥蚀断层组的断层下盘在渐新世末期遭受剥蚀,因此失去了断层活动时间的信息(图 3)。

剖面上滑脱断裂系主要表现为上陡下缓的铲式几何形态,与 7 号边界断裂相向倾斜,共同控制了

双向滑脱滚动背斜的发育(图 3)。在双向滑脱滚动背斜上发育了与滑脱作用有关的次生断裂,这些次生断裂往往向上撒开,一般未穿过 T60 界面,向下延伸与主滑脱断层交汇,在断层组合上表现为“包心菜”构造(图 3)。在地震剖面上可以观察到变形基本被限定在伸展滑脱带之上,在主滑脱带的上盘出现滑脱背斜以及反向调节断层,一般未影响下盘地层(图 3),使其基本保持早期小地堑或者半地堑的形态,没有受到滑脱作用的影响。

3.2 主要滑脱断层的几何参数

平面上, Fa 呈近 EW 向展布,西侧靠近 6 号断层的尾端,倾向 S,在 T83 界面构造图上沿走向延伸约 2.9 km(表 1);断层剖面上呈铲式,最大的落差位于其西部,达到了 1 500 m。Fb 断层位于 Fa 的东北侧,平面形态上表现为 S 型,近 EW 向展布,倾向 S,沿走向延伸约 9.0 km;在剖面上呈铲式,最大的落差位于其中东部,为 810 m(表 1)。Fc 位于滑脱断层系的东北边缘,平面上表现为直线型,近 EW 向展布,倾向 S,沿走向延伸约 8.9 km;剖面上呈铲式,最大落差在其东部末端附近,达到了 1 000 m(表 1)。Fd 位于 Fa 的东南侧,平面上为直线型,NE-SW 向展布,倾向 SE,沿走向延伸约 2.7 km;剖面上呈铲式,最大落差在其中部,约为 750 m。Fe 位于 Fd 的东北侧,平面上表现为直线型,倾向 S,为研究区最大的一条滑脱断层,沿走向延伸长度达到了 22 km;剖面上呈铲式,最大落差位于其中部,在 780 m 左右(表 1)。滑脱断层 Ff 和 Fg 位于滑脱断层系的最东部,平面延伸长度分别为 6.3 km 和 5.4 km;剖面形态上均为铲式,最大落差分别约为 380 m 和 680 m,最大落差处分别在 Ff 的东部和 Fg 的中部(表 1)。由于受到渐新世末期的挤压反转,断层下盘沉积物遭受剥蚀,导致其丢失了活动时间和强度等信息。

表 1 研究区主要伸展滑脱断层的特征

Table 1 Characteristics of extensional decollement faults in the study area

断层名	走向	倾向	沿走向长度(km)	最大落差(m)	最大落差所处位置
Fa	E-W	S	2.9	1 500	西侧与 6 号断层连接的位置
Fb	E-W	S	9.0	810	断层中东部, Fd 的正北方
Fc	E-W	S	8.9	1 000	东部
Fd	NE-SW	SE	2.7	750	中部
Fe	E-W	S	22.0	780	中部
Ff	E-W	S	6.3	380	东部
Fg	E-W	S	5.4	680	中部

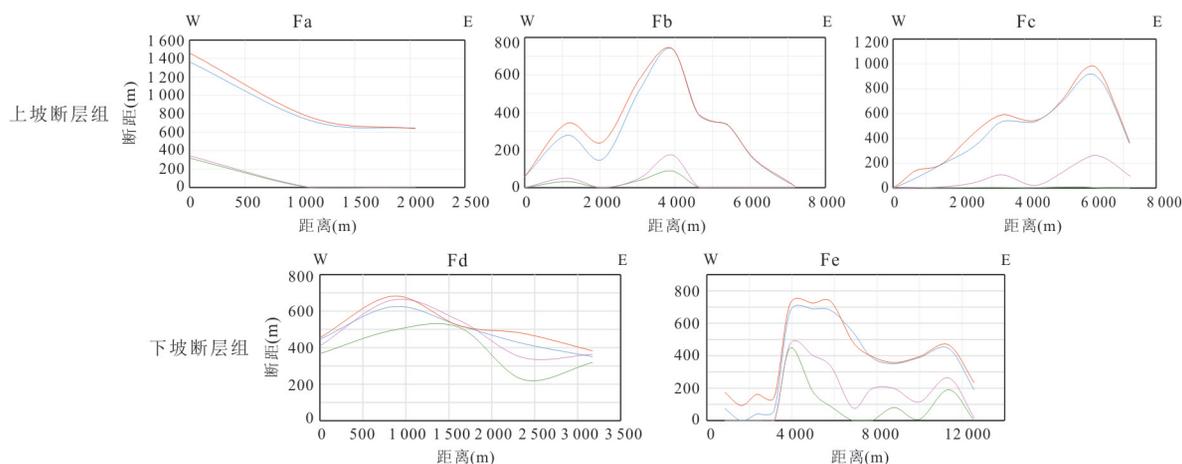


图4 滑脱断层Fa-Fe位移-距离图

Fig.4 Fa-Fe faults throw-distance diagrams of extensional decollement faults

绿色线为T83-T80累计古落差,粉色线代表T83-T72的累计古落差,蓝色线代表T83-T70的累计古落差,红色线代表T83-T60的累计古落差

3.3 滑脱断层活动性定量分析

前文已对乌石东洼的结构样式特征进行了详细的描述,为了反映伸展滑脱构造在不同时期的活动规律,下面应用位移-距离分析法,对5条断层在不同时期以及不同部位的活动性进行了统计分析.位移-距离剖面横坐标为距离,是以地震剖面上断层轨迹的一端为起点来测定,沿断层迹线各点测定的不同时期沉积的同生地层的古落差为纵坐标,将测得的同一条断层各个不同地层的古落差、距离数据投图,并将同一地层各个投影点连线即可得到一条断层不同地层沉积时期的位移-距离曲线,该曲线重点反映了沿断层走向上不同时期断层位移的变化(图4).通过分析其几何形态,即可确定正断层的生长演化历史(Muraoka and Kamata, 1983; 张军龙等, 2009; 雷宝华, 2012).从图4可以看到,Fa断层的活动总体上西强东弱,并显示两个活动幕次,第一幕次发生在流一段(T83-T80)沉积时期,此时仅有断层西段活动并沉积了流一段(T83-T80),而东段没有构造-沉积活动,这可能是6号断层尾端效应造成的;第二幕次发生在涠二段(T72-T70)沉积时期,断层的东段和西段均强烈活动,西段活动略强于东段.在涠一段(T70-T60)沉积时期Fa断层只有东段轻微活动.

Fb断裂在流一段(T83-T80)和涠三段(T80-T72)沉积时期,其西段和中段有少量的活动,此时Fb为两个相互孤立的小断层,没有相互作用(图4).在涠二段(T72-T70)沉积时期断层强烈活动,早期的两个孤立小断层相互接近、重叠并连接,同时断

层东段开始活动.在涠一段(T70-T60)沉积时期,除断层西段有少量活动外,整条断层停止活动.

Fc断层在流一段(T83-T80)沉积时期未活动.在涠三段(T80-T72)沉积时期Fc断层为两个相互孤立的小断层,位于现今断层的中段和东段,彼此之间没有相互作用,东部断层活动比西部略强(图4中Fc).在涠二段(T72-T70)时期断层强烈活动,早期孤立发育的两条小断层彼此接近、重叠、连接成一条断层.该阶段也继承了断层活动东强西弱的特点.到涠一段(T70-T60)沉积时期,断层在西部、中部和东部有3处互不影响的微弱活动.

和上述断层不同的是,Fd断层在流一段(T83-T80)沉积时期就开始强烈活动,西段比东段活动大(图4中Fd).在涠三段(T80-T72)沉积时期Fd断层继承式发展.在涠二段(T72-T70)和涠一段沉积期间Fd断层停止活动.

在流一段(T83-T80)沉积时期Fe断层已经开始活动,此时Fe断层为3条独立发育的小断层,中西段的断层发育最为强烈(图4).在涠三段(T80-T72)沉积时期3条断层经历了接近、重叠到连接的构造过程,此阶段仍以断层中西段总活动量最大.与同为下坡断层Fd不同的是,在涠二段(T72-T70)时期断层Fe仍然活动,且早期未活动的西段也发生了微弱的活动.在涠一段(T70-T60)沉积时期,Fe除中西段有微弱活动外,其余地方停止活动.断层Ff和Fg位于乌石东洼东部,该区域遭受了渐新世末期强烈的挤压,导致断层下盘沉积遭受了剥蚀,从而导致断层活动时间信息的缺失,因此本文不作讨论.

4 伸展滑脱构造发育演化过程分析

通过对乌石东洼伸展滑脱构造的几何学特征及活动性的定量分析(图4),结合盆地不同时期的地层厚度图(图5),发现滑脱断层的生长发育过程存在规律性特征.在流一段(T83-T80)沉积时期(图5a),上坡断层Fa西段与6号断层连接的位置发育,很可能是受到了6号断层尾端效应的影响.在该时期Fb的活动强度很弱,断距最大处小于100 m, Fc未发育(图4,图5a);下坡断层组Fd和Fe则表现出与上坡断层组完全相反的特征,尤其是Fd的强烈活动;Fe西段未活动,中西段、中段和东段微弱活动,发育有3个互不连接的小断层.在中西段发育的断层活动量较大,中段和东段发育的断层活动量较小(图4,图5a).总的来说,在流一段(T83-T80)沉积时期,下坡断层组强烈活动,上坡断层组除Fa西段外不发育或不活跃发育.

在涪三段(T80-T72)地层沉积时期,上坡断

层组的3条断层Fa、Fb、Fc中,Fa断层暂停发育;Fb断层除中段有少量活动外,其余部位活动停止(图5b);Fc断层在中、东两处有微弱的活动(图4,图5b).下坡断层组Fd和Fe中,Fd断层整体活动量相比流一段(T83-T80)有所减弱,但在局部仍能达到约180 m. Fe西段仍未活动,中西段、中段和东段早期独立活动的3条小断层相互接近、重叠,在涪三段(T80-T72)沉积时期连通为一条断层.断层的活动中心和沉积中心仍继承了早期的3条独立小断层(图4,图5b).在此阶段伸展滑脱断层系仍以下坡断层组活动为主.

在涪二段(T72-T70)地层沉积时期(图5c),上坡断层组和下坡断层组的活动性发生了明显的反转.上坡断层Fa断层全段活跃发育,其西段比东段发育活跃;断层Fb全段发育活跃,并经历了由早期两个独立的断层连通为一条断层的过程;Fc也进入了全段活跃期,从整体上来看东段活动性大于西段(图4,图5c).下坡断层Fd的活动性则表现出相反

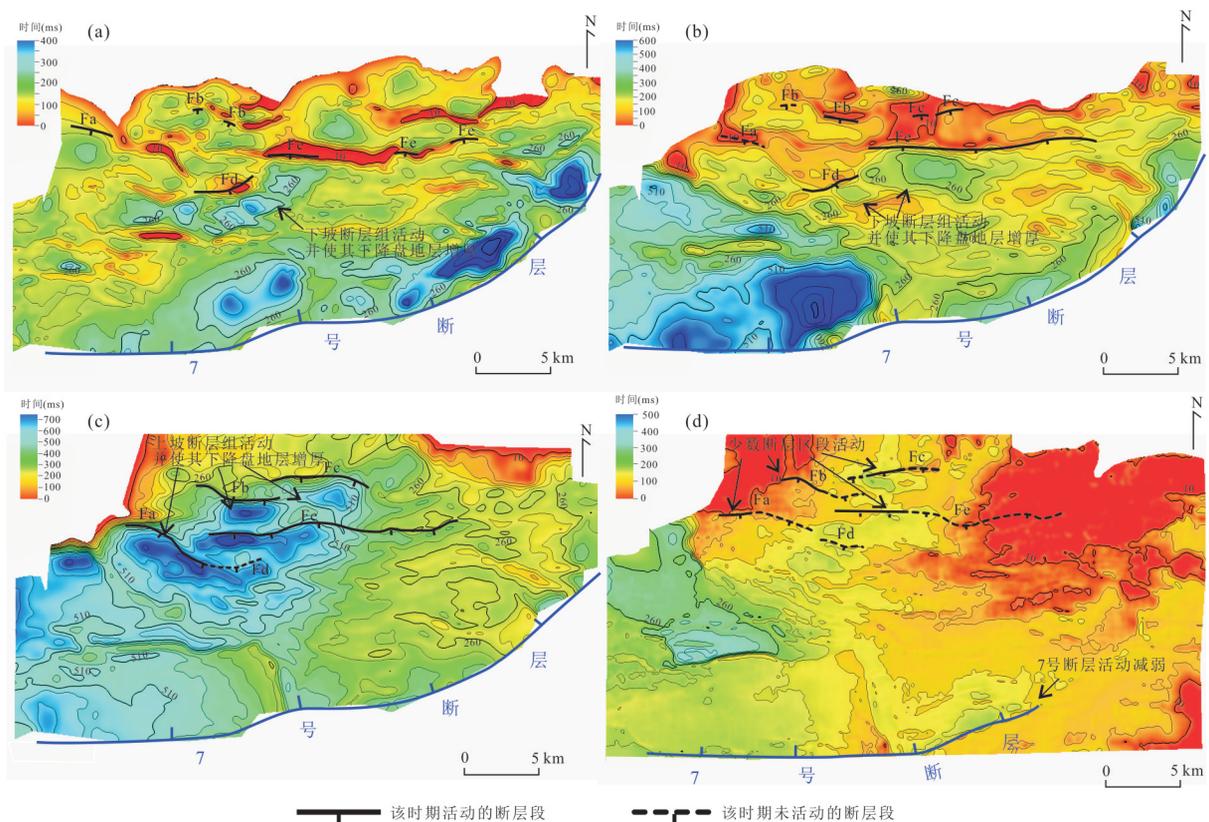


图5 断层生长发育平面厚度图

Fig.5 Plan view of fault growth and development

a. 流一段(T83-T80),该段沉积时期Fa西段活动,Fb局部活动,Fc不活动,Fd全段活跃活动,Fe西段不活动,中西段、中段和东段活动;b. 涪三段(T80-T72),该段沉积时期Fa暂停活动,Fb西段暂停活动、东段活动,Fc中、西段活动,Fd全段和Fe中段、东段活动;c. 涪二段(T72-T70),该段沉积时期Fa全段、Fb全段、Fc全段、Fe中段及东段活动,Fd全段停止活动;d. 涪一段(T70-T60),该段沉积时期Fa、Fb、Fc和Fe断层局部微弱活动

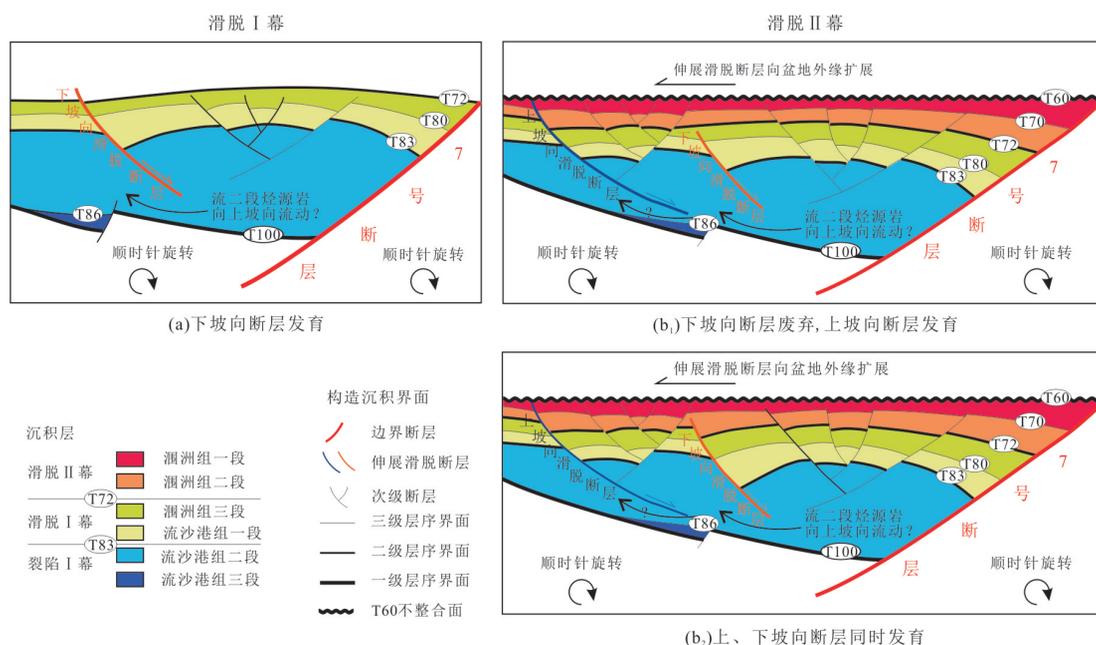


图 6 伸展滑脱断层系发育模式

Fig.6 The evolution of the extensional decollement faults

滑脱 I 幕时期下坡断层组发育,并发育相应的包心菜构造.滑脱 II 幕时期分为两种情况:(b₁)下坡断层组发育停止(例如 Fd),上坡断层组发育,并发育相应的包心菜构造;(b₂)下坡断层组(例如 Fe)和上坡断层组同时发育

的特征,在该时期停止活动.然而,对于同样为下坡断层的 Fe,情况却有所不同;Fe 全段活动,但西段活动量较小,不到 100 m,在中西段、中段和东段继承式活动(图 4,图 5c).在涠一段(T70-T60)沉积时期,只有 Fa、Fb、Fc 和 Fe 断层局部微弱活动(图 4,图 5d).

综上所述,本文提出乌石东洼伸展滑脱构造系的发育演化模式(图 6).乌石东洼的伸展滑脱断层系主要发育在裂陷 I 幕时期沉积的流二段(T86-T83)厚层烃源岩沉积之后.在裂陷 I 幕早期,乌石东洼发育有小断陷控制的离散分布的地堑或半地堑盆地,沉积了流三段(T100-T86).在裂陷 I 幕晚期,乌石东洼 7 号断层快速活动,控制了厚层流二段(T86-T83)油页岩沉积.厚层油页岩强度低,易发生塑性形变的特性使其作为后续伸展滑脱系统的滑脱面(带),为伸展滑脱断层系的发育提供了先天条件.

乌石东洼的伸展滑脱构造主要发育在裂陷 II 幕(伸展滑脱幕)时期,以 T72 界面为标志分为滑脱 I 幕和滑脱 II 幕.从厚度图(图 5)和位移-距离图(图 4)可以看出,滑脱 I 幕时期下坡断层组 Fd 和 Fe 强烈活动,上坡断层组 Fa、Fb、Fc 微弱活动或者不活动.滑脱 II 幕时期,下坡断层 Fd 停止活动,但 Fe 仍然活跃活动.上坡断层组 Fa、Fb、Fc 在此阶段开

始活跃活动.滑脱 I 幕主要由流一段(T83-T80)和涠三段(T80-T72)组成.在此阶段,7 号断层和下坡伸展滑脱断层对向倾斜发育,并控制了流一段(T83-T80)和涠三段(T80-T72)的沉积厚度变化和滑脱背斜及其轴部卷心菜式断裂系的发育(图 6).在滑脱 II 幕时期,可根据下坡断层组是否继续发育分为两种情况(图 6):(1)下坡断层组停止发育(Fd)、上坡断层组开始发育,伸展滑脱断层系向盆地外缘扩展,在这种背景下,上坡断层组和 7 号断层共同控制了涠一、二段的沉积,同时发育了滚动背斜及上坡断层组上盘的“包心菜”构造;值得注意的是,下坡断层组上盘的包心菜构造仍有活动,可能是由于上坡断层组和 7 号断层对向倾斜发育使位于滚动背斜轴部的应力释放导致的.(2)下坡断层(Fe)和上坡断层组同时发育,在这种背景下,下坡和上坡伸展滑脱断层以及 7 号断层共同控制了涠二段(T72-T70)和涠一段(T70-T60)的沉积,同时形成了滚动背斜及“包心菜”构造.

尼日尔三角洲(Fazlikhani *et al.*, 2016)和英国北海的维京地堑(Jackson *et al.*, 2009)有相似的滑脱断层向上坡向迁移的规律.在乌石东洼中,这种规律主要由 3 种因素控制:(1)裂陷 II 幕时期伸展背景下存在于地层中的伸展应力;(2)7 号断层的持续活动导致断层面及其上盘地层顺时针旋转,为伸展

滑脱断层提供重力势能和活动空间;(3)下坡断层组在逆时针旋转至其锁止角后由于摩擦力增大而不再滑移。在滑脱 I 幕时期,7号断层断层面的顺时针旋转给了下坡向伸展滑脱断层活动空间。在伸展背景和流二段上覆地层倾斜提供的重力势能下,下坡断层组开始活动。在滑脱 II 幕时期,下坡断层组达到其锁止角。7号断层持续的活动给伸展滑脱断层提供了更多的空间和更大的势能使上坡断层组开始活动发育。在滑脱 II 幕涸二段沉积时期,7号断层的活动减弱,滑脱断层的活动相应减弱(图 5),这证明了伸展滑脱断层的活动与 7 号断层的活动密切相关。Jackson and Larsen (2009)还指出伸展滑脱断层的迁移与软弱层的物质向上坡方向流动有关,这也可能是乌石东洼伸展滑脱断层向上坡向迁移的原因之一。

5 伸展滑脱构造的油气成藏意义

盆地的油气勘探前景是“先天条件”加“后天因素”综合作用的结果。乌石东洼在流二段(T86-T83)时期沉积了厚层优质烃源岩,其 TOC 的范围在 3.07%~10.35% (黄保家等,2012),为乌石东洼油气勘探的先天条件提供了良好保证。因此,断裂构造活动作为盆地形成的关键性因素,同时也是区域油气勘探的重要依据,对乌石东洼油气系统的生成与分布起了决定性作用(王嘉等,2021; Xue *et al.*, 2021)。滑脱构造形成的滚动背斜为张性构造,其应变中和面位于背斜底部,而非传统意义的中部。这种张性断裂沟通了流二段(T86-T83)油页岩和始新世末期到渐新世沉积的砂岩储层,为油气运移提供了良好的通道。同时,涸二段(T72-T70)时期沉积的中深湖相泥岩可作为封闭油气良好的盖层,满足“下生上储”的油气成藏模式,为大型含油构造的形成提供了有利条件(王浩然等,2018)。

前人对南堡凹陷、歧口凹陷(张东东等,2013)和乌石凹陷(满晓等,2021;徐长贵和范彩伟,2021)滑脱构造的研究表明,滑脱构造对油气的运移和圈闭的形成有促进作用。尼日利亚所发现的油气田绝大部分与滑脱断层伴生的滚动背斜有关,且由主断裂控制形成的圈闭背斜面积较大,含油气丰富;受次级分支断裂控制形成的圈闭面积较小(侯高文等,2005;岳鹏升,2012)。从始新世末期到渐新世末期,滑脱断层的强烈活动导致了渐新世地层的旋转,并提供了大量的沉积物可容空间,同时在滚动背斜之上发育了一系

列的次生张性断裂,为油气的储存和运移提供了基础。已钻油气勘探井的结果表明该区域的油气富集块平均油柱高度高于一般伸展断层控制块约 148%(徐长贵和范彩伟,2021),为形成大型油气田提供了先行条件,是油气勘探的有利区带。

6 结论

(1)根据 T100 和 T60 两个一级层序界面将北部湾盆地乌石东洼划分为裂陷幕(T100-T60)和坳陷幕(T60-海底)。在裂陷幕中,根据二级层序界面 T83 将盆地划分为裂陷 I 幕(T100-T83)和裂陷 II 幕(伸展滑脱幕)(T83-T60)。在裂陷 II 幕中又以三级层序界面 T72 进一步划分为滑脱 I 幕(T83-T72)和滑脱 II 幕(T72-T60)。

(2)乌石东洼的伸展滑脱构造以流二段(T86-T83)沉积的厚层油页岩为滑脱面(带),在盆地裂陷 II 幕阶段近 N-S 向的伸展背景下和 7 号断层共同控制了“跷跷板式”的流一段(T83-T80)到涸一段(T70-T60)沉积,形成了双滑脱滚动背斜构造并在其轴部发育了大量的张性断裂,这些张性断裂向上发散、向下与主滑脱断层交汇,形成了典型的“包心菜”构造。

(3)滑脱断层的发育具有由早到晚沿缓坡带下坡(深部)到缓坡带上坡(浅部)活动性迁移的规律。靠近乌石东洼沉积沉降中心的下坡断层组 Fd 和 Fe 在流一段(T83-T80)到涸三段(T80-T72)活动,并控制了此期间发育的“包心菜”构造。远离乌石东洼沉积沉降中心的上坡断层组的滑脱断层 Fa、Fb、Fc 从涸二段(T72-T70)到涸一段(T70-T60)开始活动并伴有相应“包心菜”构造的发育。这种活动规律受到了 7 号断层顺时针旋转所提供的活动空间和势能以及下坡断层组在滑脱 II 幕时期达到其锁止角的控制。

References

- Ai, N.P., Ren, J.Y., Qi, P., et al., 2009. The Redefinition and Geological Significance of Extensional Decollement Structure Systems in the Qikou Depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 343–351 (in Chinese with English abstract).
- Back, S., Strozyk, F., Kukla, P. A., et al., 2008. Three-Dimensional Restoration of Original Sedimentary Geometries in Deformed Basin Fill, Onshore Brunei Darussalam, NW Borneo. *Basin Research*, 20(1): 99–117.

- <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00343.x>
- Bai, B., Kang, H. Q., Cheng, T., et al., 2016. Gravity Dcollement Structural System in Offshore Basins of Northeast Brazil. *Marine Geology Frontiers*, 32(4): 31—36 (in Chinese with English abstract).
- Fazlikhani, H., Back, S., 2015. The Influence of Differential Sedimentary Loading and Compaction on the Development of a Deltaic Rollover. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 136—149. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.005>
- Fazlikhani, H., Back, S., Kukla, P. A., et al., 2016. Interaction between Gravity - Driven Listric Normal Fault Linkage and Their Hanging - Wall Rollover Development: A Case Study from the Western Niger Delta, Nigeria. *Geological Society, London, Special Publications*, 439(1): 169—186. <https://doi.org/10.1144/sp439.20>
- Hou, G.W., Liu, H.F., Zuo, S.J., 2005. A Study of Distribution Characteristics of Petroleum in Niger Delta Basin and Their Controlling Factors. *Oil & Gas Geology*, 26(3): 374—378 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D.S., Deng, Y., Zhang, J.X., et al., 2016. Palaeogene Fault System and Hydrocarbon Accumulation in East Wushi Sag. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38(4): 27—36 (in Chinese with English abstract).
- Hu, L., Li, C., Jin, Q.Y., et al., 2021. Experimental Analysis on Influence of Plastic Formation on Characteristics of Fault Development under Extensional Stress. *Earth Science*, 46(5): 1749—1757 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B.J., Huang, H.T., Wu, G.X., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Formation Mechanism of Eocene Lacustrine Organic-Rich Shales in the Beibuwan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(1): 25—31 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, C. A. L., Larsen, E., 2009. Temporal and Spatial Development of a Gravity-Driven Normal Fault Array: Middle-Upper Jurassic, South Viking Graben, Northern North Sea. *Journal of Structural Geology*, 31(4): 388—402. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.01.007>
- Laubscher, H. P., 1988. Décollement in the Alpine System: An Overview. *Geologische Rundschau*, 77(1): 1—9. <https://doi.org/10.1007/BF01848672>
- Li, C.R., Zhang, G.C., Liang, J.S., et al., 2012. Characteristics of Fault Structure and Its Control on Hydrocarbons in the Beibuwan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 195—203 (in Chinese with English abstract).
- Lei, B. H., 2012. Review of Methods with Quantitative Studies of Activity Intensity of the Growth Fault. *Advances in Earth Science*, 27(9): 947—956 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.B., Xia, B., Lü, B. F., et al., 2010. Comparative Analysis of Inversion Structure with Its Easily Confused Structures. *Geoscience*, 24(4): 744—748 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.F., Dong, Y.X., Wang, H., 2010. Antiform Negative Flower Structure in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 35(6): 1029—1034 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X.Y., Suo, S.T., 1984. On Gliding Nappes and Multi-Level Detachment Structures in the Lithosphere. *Acta Geologica Sinica*, 58(3): 205—213 (in Chinese with English abstract).
- Man, X., Hu, D.S., Fan, C.W., et al., 2021. Study on the Origin of “Antiform Negative Flower Structure” and the Difference of Oil and Gas Enrichment Law in Wushi Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 33(5): 32—39 (in Chinese with English abstract).
- Muraoka, H., Kamata, H., 1983. Displacement Distribution along Minor Fault Traces. *Journal of Structural Geology*, 5(5): 483—495. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90054-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90054-8)
- Ren, J.Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12): 4901—4920 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.R., Fu, G., Su, B.L., et al., 2018. A Method to Determine Preferential Pathways for Hydrocarbon Migration in “Lower Source Rock and Upper Reservoir” Combination and Its Application. *Oil & Gas Geology*, 39(6): 1237—1245 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Luan, X.W., He, B.S., et al., 2021. Characteristics and Genesis of Faults in Southwestern Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 916—928 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., Fan, C.W., 2021. New Exploration Progress and Thinking of Offshore Large-Medium-Sized Oil and Gas Fields in the Western South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 33(2): 13—25 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Zhao, M., Liu, X. J., 2021. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of the Metamorphic Buried Hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Science*, 32(4): 919—926. <https://doi.org/>

10.1007/s12583-021-1415-1

- Yang, X.B., Chen, Z.Y., Man, Y., et al., 2017. Sand Distribution Mechanism of Liushagang Formation in Eastern Wushi Area. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 24(3): 342–345 (in Chinese with English abstract).
- Yue, P.S., 2012. Research of Petroleum Geology and Petroleum Resource Potential in Niger Delta Basin (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.D., Liu, C.Y., Huang, Y.J., 2013. Analysis on Decollement Structure of Qikou Sag and the Petroleum Geological Significance. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 48(1): 263–274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.L., Meng, Q. A., Zhang, C.H., et al., 2009. A Quantitative Study on the Growth of Boundary Faults of the Xujiaweizi Faulting Depression in the Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 87–96 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 艾能平, 任建业, 祁鹏, 等, 2009. 歧口凹陷伸展滑脱构造系统的厘定及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 33(3): 343–351.
- 白博, 康洪全, 程涛, 等, 2016. 巴西东北部海域盆地重力滑脱构造体系特征. *海洋地质前沿*, 32(4): 31–36.
- 侯高文, 刘和甫, 左胜杰, 2005. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素. *石油与天然气地质*, 26(3): 374–378.
- 胡德胜, 邓勇, 张建新, 等, 2016. 乌石凹陷东区古近系断裂系统与油气成藏. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 38(4): 27–36.
- 胡林, 李才, 金秋月, 等, 2021. 伸展背景下塑性地层对断裂发育特征影响的实验分析. *地球科学*, 46(5): 1749–1757.
- 黄保家, 黄合庭, 吴国璋, 等, 2012. 北部湾盆地始新统湖相富有机质页岩特征及成因机制. *石油学报*, 33(1): 25–31.
- 李春荣, 张功成, 梁建设, 等, 2012. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用. *石油学报*, 33(2): 195–203.
- 雷宝华, 2012. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述. *地球科学进展*, 27(9): 947–956.
- 刘见宝, 夏斌, 吕宝凤, 等, 2010. 反转构造与其易混淆构造的对比分析. *现代地质*, 24(4): 744–748.
- 刘晓峰, 董月霞, 王华, 2010. 渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造. *地球科学*, 35(6): 1029–1034.
- 马杏垣, 索书田, 1984. 论滑覆及岩石圈内多层次滑脱构造. *地质学报*, 58(3): 205–213.
- 满晓, 胡德胜, 范彩伟, 等, 2021. 乌石凹陷“背形负花构造”成因及油气富集规律差异性研究. *中国海上油气*, 33(5): 32–39.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等, 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析. *地球物理学报*, 61(12): 4901–4920.
- 王浩然, 付广, 宿碧霖, 等, 2018. 下生上储式油气运移优势路径确定方法及其应用. *石油与天然气地质*, 39(6): 1237–1245.
- 王嘉, 栾锡武, 何兵寿, 等, 2021. 南海北部珠江口盆地西南段断裂特征与成因讨论. *地球科学*, 46(3): 916–928.
- 徐长贵, 范彩伟, 2021. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考. *中国海上油气*, 33(2): 13–25.
- 杨希冰, 谌志远, 满勇, 等, 2017. 乌石东区流沙港组地层断裂控砂机制. *断块油气田*, 24(3): 342–345.
- 岳鹏升, 2012. 尼日尔三角洲盆地地质特征及油气资源潜力研究(硕士学位论文). 西安: 长安大学.
- 张东东, 刘池洋, 黄翼坚, 2013. 歧口凹陷滑脱构造剖析及对油气地质意义. *地质科学*, 48(1): 263–274.
- 张军龙, 蒙启安, 张长厚, 等, 2009. 松辽盆地徐家围子断陷边界断裂生长过程的定量分析. *地学前缘*, 16(4): 87–96.