东营凹陷沉积-沉降中心迁移特征与机制研究

林玉祥，赵承锦，舒　永，郑慧铭，朱传真，吴玉琛，李　佳
（山东科技大学 地球科学与工程学院，山东 青岛 266590）

摘　要：通过区域地质、地层厚度、沉积特征以及断裂活动强度等分析，探讨东营凹陷新生代不同时期构造活动特征与沉积-沉降中心迁移规律，从构造动力学角度对沉降中心迁移机制提出合理解释。研究表明，东营凹陷新生代可划分为控凹断裂主控期、控凹控洼断裂共控期和拗陷期 3 个沉降阶段，在利津、牛庄和博兴一带存在 3 个呈“逆时针”旋转的沉降中心。沉降中心主要受活动速率较大的断裂控制，其迁移与盆地伸展背景下的走滑作用密切相关。但沉积中心的迁移除了受控于沉降中心外，还与沉积环境有关。在地壳表层，东营凹陷沉积-沉降中心的动态迁移受断裂走滑与伸展断陷的共同控制。在中国东部“三个板块、两种俯冲”构造动力学背景下，板块俯冲是地幔对流平衡破坏的触发因素，板块俯冲速度与角度的差异导致岩石圈不同部位的底侵，从而引发地表不同位置不同强度的断陷与走滑，在盆地内部表现为沉降中心的动态迁移。

关键词：沉降中心；沉积中心；迁移机制；伸展走滑；地幔对流；新生代沉积；东营凹陷

中图分类号：TE112.322　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-3767(2016)06-0001-09

Migration Characteristics and Geodynamic Mechanism of Depocenter and Subsiding Center of Dongying Sag

LIN Yuxiang, ZHAO Chengjin, SHU Yong, ZHENG Huiming, ZHU Chuanzhen, WU Yuchen, LI Jia
(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the analysis of regional geology, stratigraphic thickness, sedimentary characteristics and fracture activity intensity, the tectonic activity and migration characteristics of the subsiding center and depocenter of the Dongying sag in different periods of Cenozoic were studied and a reasonable explanation was put forward on the migration mechanism of the subsiding center from the perspective of tectonic dynamics. The results show that the Dongying sag in Cenozoic can be divided into three periods, namely, sag-controlling period, both sag-controlling and subsag-controlling period, downwarp period, and that the three subsiding centers in Lijin, Niuzhuang and Boxing are those of anti-clockwise rotation. The subsiding centers were chiefly controlled by fractures with stronger activity rate and their migration was closely related to strike-slip under the background of basin extension. But the migration of the depocenter was not only controlled by the subsiding center, but also influenced by the sedimentary environment. In the surface of crust, the dynamic migration of the depocenter and the subsiding center was controlled by both the fault strike slip and extensional rift. Under the tectonic dynamics of “three plates, two subductions” in Eastern China, the plate subducting was the triggering factor for the disturbance of mantle convection balance. Different speeds and angles of plate subducting resulted in the underplating in different parts of the lithosphere, leading to the formation of faulted depression and strike-slip, which took the form of dynamic migration of subsiding centers

收稿日期：2016-01-08
基金项目：国家自然科学基金项目（41172108，71303140）；国家大型油气田与煤层气开发项目（2011ZX05033-04，2011ZX05004-01）
作者简介：林玉祥（1963—），男，山东临清人，教授，博士生导师，主要从事油气地质勘探方面的研究工作.
E-mail：sdkdlyx@126.com

in the interior of the basin.

Key words: subsiding center; depocenter; migration mechanism; extend and strike-slip; mantle convection; Cenozoic sedimentation; Dongying sag

东营凹陷是古近纪伸展断陷(裂谷)[1],为北断南超的半地堑构造,沉降中心与堆积中心基本一致。目前对堆积中心和沉降中心的认识较一致,但如何确定其沉积中心存在较大争议。刘池洋[2]、曹红霞[3]、Gary[4]、朱筱敏[5]等从不同角度阐述了沉积中心的含义。沉积中心受构造沉降、沉积速率、物源补给、水深等因素影响,其分布范围局限且随时空变化不断迁移。大量油气勘探实践表明,东部陆相断陷含油气盆地的油气运移距离较近,油气分布在烃源岩上下层位以及生烃中心附近,因而沉积、沉降中心及其迁移规律的研究,与油气勘探主要目的层和有利区的确定直接相关,是油气地质研究与勘探领域的重要研究内容。本文对沉积中心重新定义为沉积厚度较大、沉积物粒度较细、沉积水体较深的沉积区。因此,通过编制地层厚度图、沉积相展布图,结合沉积环境,综合圈定沉降中心和沉积中心,确定东营凹陷新生代不同时期沉降中心和沉积中心的分布范围及其迁移规律,为分析盆地构造-沉积迁移规律及其成因机制奠定基础[6]。

1 地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东南部,西与惠民凹陷相邻,东邻青坨子凸起,北与陈家庄凸起以陈南断裂为界,南以齐广断裂与鲁西隆起相隔,是济阳坳陷油气资源最为丰富的凹陷之一(图 1(a))。东营凹陷古近纪是典型的断陷湖盆,沉积了厚达数千米的古近纪地层(图 1(b))。东营凹陷包括利津洼陷、牛庄洼陷、民丰洼陷、博兴洼陷以及中央隆起带和南部缓坡带,形成“四洼一隆一斜坡”的构造格局(图 1(a),图 1(c))。

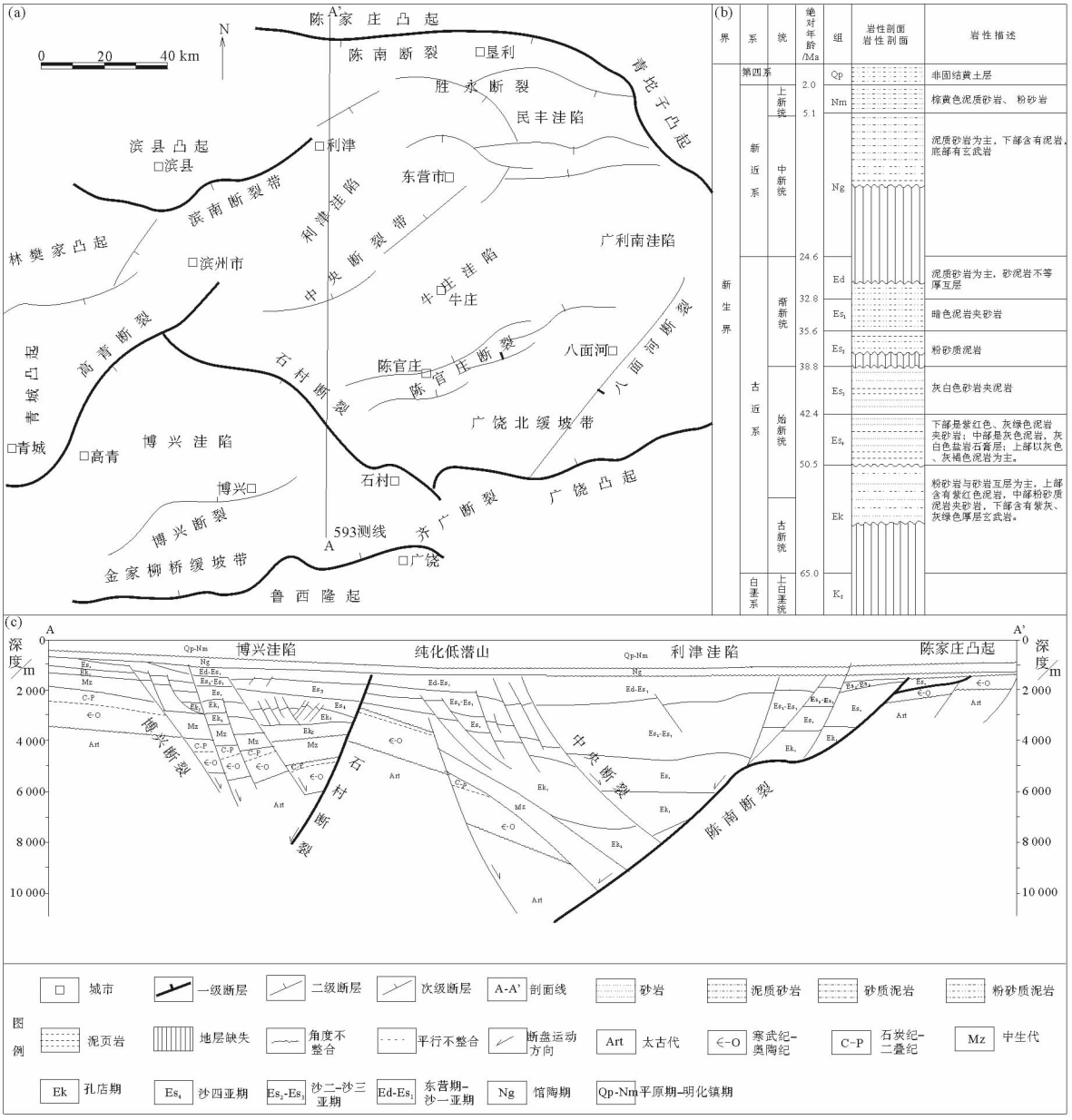
2 沉积相分布特征

2.1 古近系

1) 孔店组:堆积中心位于利津洼陷东北部(图 2(a)),营 42 井以西。堆积中心长轴延伸方向呈 NEE 向;另外两个次级堆积中心长轴均呈 NW 向延伸,分别位于牛庄洼陷王 79 井、博兴洼陷樊 19 井附近。孔店组主要发育冲积平原相、深湖-半深湖相、冲积扇相和滨浅湖相。靠近凸起的南部发育冲积扇相,深湖-半深湖相主要发育在民丰洼陷和牛庄洼陷。

2) 沙河街组:①沙四亚段,堆积中心分布在利 1、民 101 和气东 2 井附近(图 2(b))。利津、牛庄洼陷的沉积体长轴呈 NE-NEE 向展布,而民丰洼陷长轴为 EW 向,博兴洼陷为近 NW 向。与孔店组相比,沙四亚段湖盆水体向西南方向扩展,深湖-半深湖相主要分布在北部的利津洼陷和牛庄洼陷,滨浅湖相广泛分布。南、北斜坡带发育水下扇相,八面河地区开始发育三角洲相。②沙三亚段,主要堆积中心在利 1 井附近,地层最厚达 1 600 m(图 2(c)),次级堆积中心分布在牛 25 井和营 42 井附近。利津洼陷和牛庄洼陷沉积体长轴为 NNE-NE 向,博兴洼陷和民丰洼陷长轴均呈 NW 向。深湖-半深湖相分布范围向西南扩展至博兴断裂附近;滨浅湖相主要分布在南部缓坡带。③沙二亚段,利 1 井附近仍是地层厚度最大区域(图 2(d)),厚达 700 m。沉积体长轴延伸方向与沙三亚段类似,只有博兴洼陷沉积体由沙三亚段 NW 向变为 NWW 向延伸。沙二亚段沉积格局变化明显,湖盆局限在西部,三角洲相成为主要沉积相,深湖-半深湖相分布范围急剧萎缩,仅分布在高青断裂东侧。④沙一亚段,最大堆积中心位于利 1 井南(图 2(e)),湖盆展布范围达到最大,以深湖-半深湖相为主,滨浅湖相呈环状围绕深湖-半深湖相分布,南部及西南部发育三角洲相,滨县凸起、北部发育冲积扇相。

3) 东营组:最大堆积中心分布在利 1 井以东和樊 12 井附近(图 2(f))。利 101 井区、牛 25 井区为次级堆积中心。民丰洼陷沉积体堆积长轴为 EW 向,利津洼陷沉积体长轴为 NE 向。此时湖盆萎缩,冲积平原相广布,原来统一的大湖盆被分割为 3 个独立小湖盆。滨浅湖相分布在利津洼陷东北部、牛庄洼陷西南部和博兴洼陷中西部。



(a)构造纲要图；(b)地层柱状图；(c)构造剖面图

图 1　东营凹陷新生界地质特征简图

Fig. 1　The geological map of Dongying sag in Cenozoic

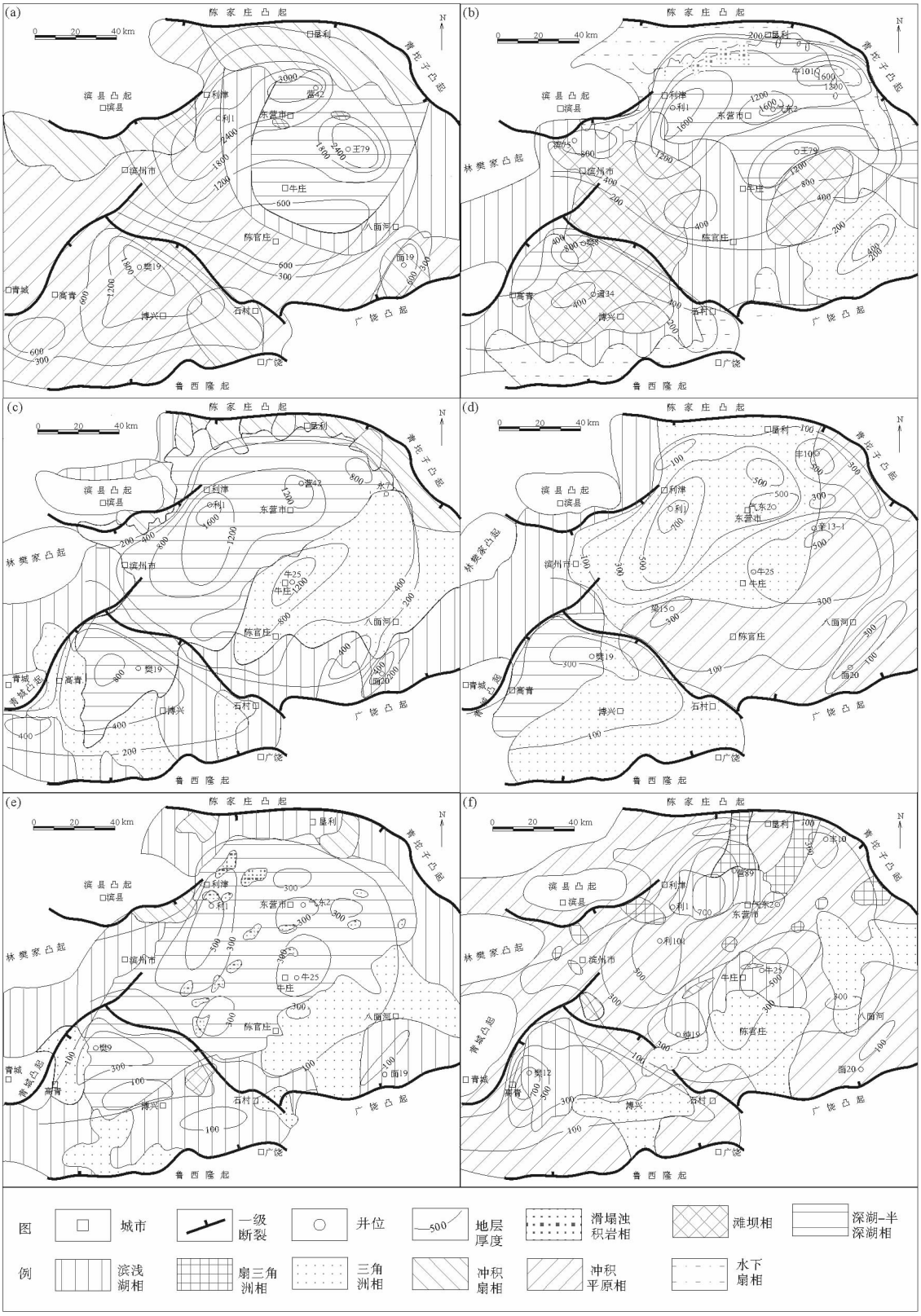
2.2　新近纪

1）馆陶组：地层厚度普遍在 200 m 左右，樊 124 井区和垦利地区是本期堆积中心。河流相广布，河道充填亚相是主要沉积相，湖成沼泽相在凹陷西南、西北部边缘分布，八面河地区发育冲积扇相，牛庄及其以东地区发育心滩亚相。

2）明化镇组：地层厚度和沉积格局变化均不大，没有明显堆积中心。河流相进一步发育，以泛滥平原亚相和河道充填亚相为主，偶见牛轭湖亚相。

3　断裂及其活动

断陷盆地沉降-沉积中心的分布和迁移规律受伸展断层系统控制，其中主干伸展断层的几何学和运动学特征起主要作用[9]。



(a)孔店组;(b)沙四亚段;(c)沙三亚段;(d)沙二亚段;(e)沙一亚段;(f)东营组

图 2　东营凹陷古近纪地层及其沉积特征[7-8]

Fig. 2　The strata and sedimentary characteristics of Dongying sag in Paleogene

3.1 控凹断裂

断层活动速率能反映控凹断裂的平均活动强度[10-11](图 3),从控凹断裂活动速率来看,沙三亚期是控凹断层最为活跃时期,此时的湖盆分布范围最广,水体最深,为新生代断陷盆地发育的高峰期;其他时期按活动强弱先后顺序依次为沙四亚期、沙二亚期、沙一亚期、孔店期、东营期和馆陶期;孔店期虽然断裂活动速率较小,但其地质时间长达 14.5 Ma,形成的断裂落差最大,因此地层厚度最厚。从断层走向来看,NE(E)向断裂比 NW 向断裂活动强度大,与 N(N)W 向拉张的区域构造应力场有关。

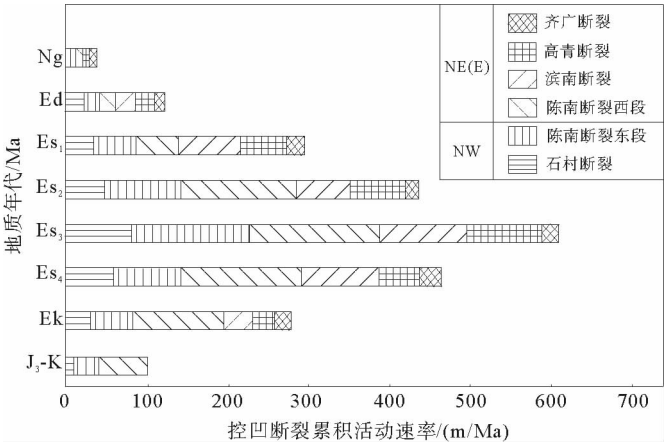


图 3 控凹断裂活动速率柱状图[12]

Fig. 3 The histogram of the sag-controlling faults' cumulative activity rate

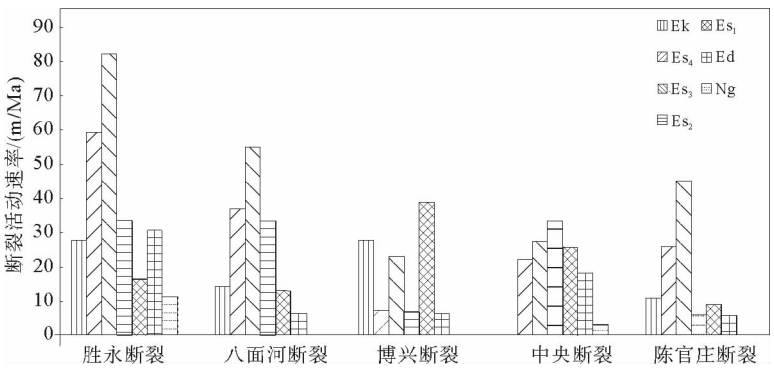


图 4 控洼断裂活动速率柱状图

Fig. 4 The histogram of the subsag-controlling faults' activity rate

3.2 控洼断裂

从控洼断层活动速率可知(图 4),胜永断裂和博兴断裂呈"多峰"形态,胜永断裂主峰在沙三亚期,最大活动速率大于 80 m/Ma;博兴断裂主峰在沙一亚期,活动速率 40 m/Ma;胜永断裂次峰在东营期,博兴断裂次峰在孔店期、沙三亚期;相比而言,八面河断裂、中央断裂和陈官庄断裂呈"单峰"形态,主活跃期在沙三亚期、沙二亚期和沙三亚期。总体看来,沙三亚期不仅是控凹断裂的主活跃期,也是控洼断裂的主活跃期,这一时期胜永断裂、八面河断裂和陈官庄断裂活动达到峰值。

4 沉积沉降中心迁移规律及油气地质意义

4.1 沉降中心时空演化及其与断裂活动的关系

东营凹陷新生代沉降中心的时空迁移规律(图 5):1)沉降中心的迁移与盆地的伸展作用息息相关,且沉降中心主要受活动强烈(拉张速率较大)的断裂控制,例如高青断裂、石村断裂和博兴断裂此消彼长的关系控制了博兴洼陷沉降中心的迁移特征;2)东营凹陷受断裂的分割作用存在利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷 3 个相对独立演化的沉降中心,这 3 个沉降中心总体表现为"逆时针"迁移趋势,与华北地台自古生代以来呈逆时针"O"型迁移趋势吻合[14];3)东营凹陷新生代演化历史可分为控凹断裂主控期、控凹控洼断裂共控期和拗陷期 3 个沉降阶段:①控凹断裂主控期:主要是陈南断裂和石村断裂控制孔店期的沉降中心,陈南断裂东段、石村断裂分别控制牛庄洼陷、博兴洼陷的沉积体呈 NW 向展布,而陈南断裂西段控制的沉积体为 NE 向展布。

②控凹控洼断裂共控期：滨南断裂、中央断裂和胜永断裂共同控制了利津洼陷沉降中心，陈南断裂东段和陈官庄断裂引起牛庄洼陷沉降中心的迁移，高青断裂、石村断裂和博兴断裂主导了博兴洼陷沉降中心的迁移。③拗陷期：进入新近纪，控凹断裂和控洼断裂的活动性显著降低，凹陷进入整体热沉降阶段[15-16]，在古近纪断陷型盆地的基础上叠合发育了新近纪坳陷型盆地。④在沉降中心的迁移过程中东西分量始终大于南北分量，说明盆地断陷过程中不仅存在NNW向拉伸使得盆地近南北向伸展，同时也伴随着走滑作用。

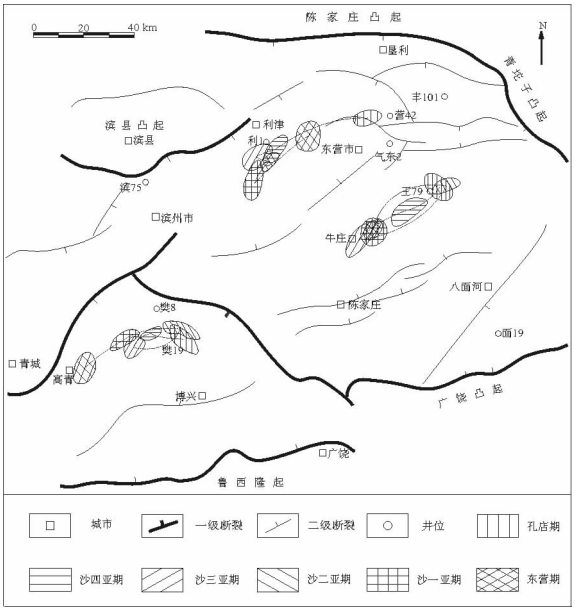


图5 东营凹陷新生代沉降中心迁移规律

Fig. 5 The subsiding center migration pattern of Dongying sag in Cenozoic

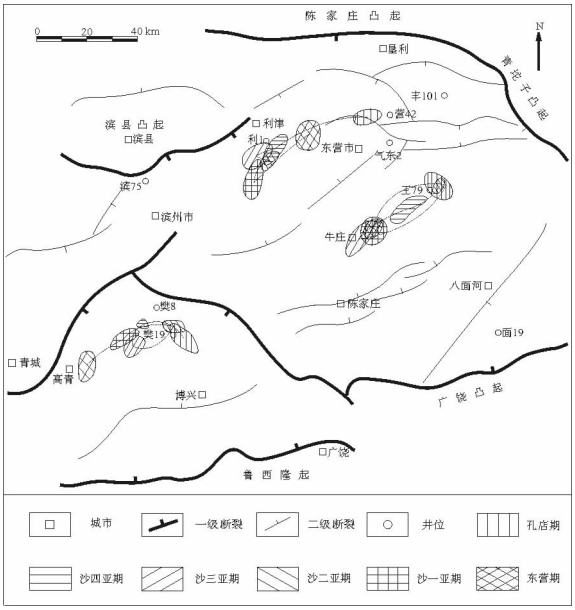


图6 东营凹陷新生代沉积中心迁移规律

Fig. 6 The depocenter migration pattern of Dongying sag in Cenozoic

4.2 沉积中心迁移规律及油气地质意义

构造沉降为沉积体堆积提供了可容纳空间，但是沉降最大处未必是沉积中心。沉积中心主要受物源、水深、水动力条件等多重因素影响，集中体现在稳定沉积相发育区，但中心相范围较大(图2(c))，仅靠沉积相确定沉积中心范围就失去了意义。因此，本文采用堆积中心与沉积相相结合的方法综合确定东营凹陷的沉积中心并分析其迁移演化规律(图6)。总体看来，沉积中心迁移主要受控于沉降中心的迁移。与沉降中心类似，沉积中心迁移轨迹大致呈逆时针。博兴洼陷沙四亚期、沙二亚期、东营期以及牛庄洼陷沙四亚期、沙二亚期的沉积中心范围小于沉降中心范围，其范围是沉积厚度较大与深水沉积相叠合区。由此看来，沉积中心除受构造沉降影响外，还与沉积环境相关。

沉积中心的迁移直接决定着生油凹陷的位置及其变化，控制着生、储、盖层的分布和时代。沙四期和沙三期为快速沉降期，东营凹陷表现为沉降扩展，沉积物的可容纳空间增大，湖水变深，发育沙四上亚段和沙三下亚段2套优质烃源岩，沉积中心为深水区细粒沉积物，处于缺氧环境、具备较高的泥页岩生产力，优质烃源岩区与沉积中心重叠。沉降速率变慢使得可容空间增加减缓，盆地快速充填时期也是储集层发育阶段，储集层主要发育层段为沙三上亚段至沙二段，储集岩主要为砂砾岩扇体(包括扇三角洲、冲积扇、水下扇和浊积扇等)、三角洲砂体和滩坝砂体，储集体围绕沉降中心呈环状分布，以构造油气藏和构造-岩性油气藏为主。东营凹陷主要存在着3种生储盖组合形式：沙四上亚段和沙三中、下亚段“自生自储”；沙三上亚段和沙二段为“下生上储”型；沙四上亚段为烃源岩沙三中亚段为储层的“下生上储”型。古近系有沙四下亚段蒸发岩和沙三段中上部中厚层泥岩2套区域性盖层且洼陷内广泛存在超压，压力系数达1.5～1.7，超压中心多为生烃中心，异常压力对于油气成藏起到一定封闭作用。优质烃源岩和超压中心受沉积中心分布控制并随着沉积

中心的变化而迁移，而有利储集体在沉降速率变慢期发育且呈环带状围绕沉降中心分布，通过断层-砂体输导体系将生烃中心的油气运移至储集体中成藏。

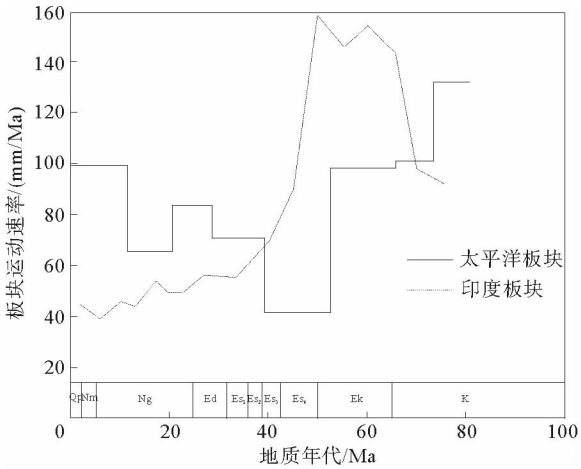


图 7　新生代以来太平洋板块与印度板块活动速率折线图[17-19]

Fig. 7　The activity rate line chart of the Pacific plate and India plate since the Cenozoic Era

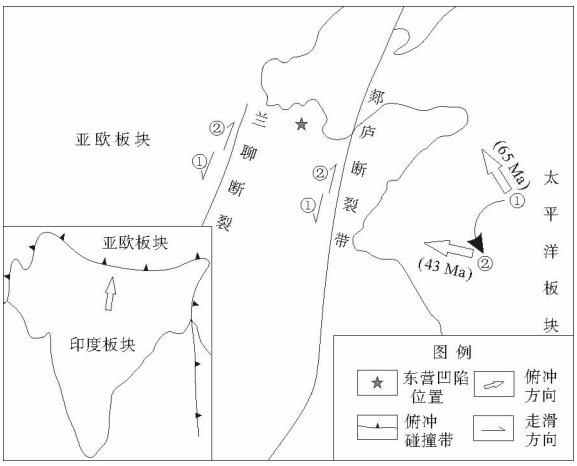


图 8　沉降中心迁移的构造动力学示意图

Fig. 8　The tectonic dynamic mechanism map of subsiding center migration

5　沉积-沉降中心迁移的动力学机制

通过东营凹陷沉降中心研究发现，古近纪东营凹陷各时期沉积-沉降中心总体呈“逆时针”迁移，这与东营凹陷所处的大地构造背景密切相关[16]。不同构造演化阶段断裂走滑与伸展断陷控制了沉降中心动态迁移与折返，中国东部在“三个板块、两种俯冲”的构造动力学背景下可划分为 3 个构造演化阶段(图 7～8)。①65～53 Ma，“西强东强”阶段。太平洋板块和印度板块都保持了较高的运动速率，此阶段是印度板块的主碰撞期，印度板块俯冲导致中国大陆软流圈向东蠕散加上太平洋板块高速俯冲引发地幔隆起，岩石圈强烈伸展减薄。②53～43 Ma“西强东弱”阶段。太平洋板块运动速率下降至 38 mm/Ma，地幔对流减弱，但俯冲方向始终是 NNW 向；印度板块持续高速俯冲，引起地幔流蠕散对中国东部断陷盆地起主控作用[20]。这 2 个阶段对应孔店期—沙三亚期，3 个主要洼陷沉降中心的迁移方向除受板块俯冲引起的 NNW 向伸展外，与伸展伴生的走滑运动主导了沉降中心平行于走滑断裂的迁移。③43～23 Ma“西弱东强”阶段。印度板块活动速率持续减弱，与欧亚板块主碰撞期已经结束；43 Ma 太平洋板块俯冲方向“逆时针”旋转为 NWW 向，郯庐断裂由左旋走滑变为右旋走滑[21]，此时沉降中心迁移方向也发生了较大变化。沙二亚期，牛庄洼陷、博兴洼陷的沉降中心受郯庐断裂和兰聊断裂右行走滑影响，沉降中心折返。23 Ma 至今，日本海盆和冲绳海槽先后于 23、10 Ma 发生扩张，使得包括渤海湾盆地在内的中国东部新生代盆地遭受挤压应力[22]，凹陷内沉降幅度较小，趋于均一化。

沉降中心在构造应力角度与方向不断变化条件下发生逆时针旋转及 SW-NE 向折返迁移，而板块俯冲变化与地幔对流引起地表构造应力的转变。太平洋板块的俯冲碰撞以及印度板块的“远源效应”使得中国东部上地幔的地幔对流平衡遭到不同程度破坏，由于物质密度的不均一性引起地幔物质在水平方向上呈“波浪状”迁移，波峰处上地幔隆起，上部岩石圈发生底侵作用，引发地表强烈断陷形成沉降中心。由于俯冲角度和方向差异导致岩石圈底侵和地表断陷位置在不同时期有差异，盆地内部表现为沉降中心的动态迁移。

6　结论

1）东营凹陷新生代沉积中心与沉降中心基本一致，沉积中心迁移除了受控于沉降中心迁移，还与沉积相尤其是中心相发育区密切相关。沉积-沉降中心的迁移直接决定着生油凹陷的位置及其变化，控制着生、

储、盖层的分布和时代。

2）沉降中心的迁移与盆地的伸展走滑息息相关，而且沉降中心主要受活动强烈的断裂控制。东营凹陷受断裂的分割作用存在利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷 3 个相对独立演化的沉降中心，是由太平洋板块俯冲方向发生 NNW-NWW 逆时针旋转引起的，在东营凹陷表现为断裂由左行走滑变为右行走滑，因而 3 个沉降中心各个阶段总体表现为“逆时针”迁移趋势。

3）新生代，东营凹陷沉降中心的动态迁移与地幔深部对流系统密切联系。不同时期太平洋板块与印度板块向欧亚板块的俯冲强度和角度各有差异，使地幔对流平衡遭到不同程度破坏。核幔边界物质密度的差异引发地幔物质波浪式运动，上部岩石圈发生底侵作用，地表强烈断陷形成沉降中心。由于俯冲角度和方向的差异导致岩石圈底侵和地表断陷位置在不同时期有差异，盆地内部现为沉降中心的动态迁移。

参考文献：

[1]马丽娟，郑和荣，解习农. 东营凹陷中央隆起带断裂构造及油气运移[J]. 石油与天然气地质，2005，26(2)：246-251.
MA Lijuan，ZHENG Herong，XIE Xinong. Faulted structures and hydrocarbon migration in central uplift belt of Dongying sag[J]. Oil & Gas Geology，2005，26(2)：246-251.

[2]刘池洋. 沉降盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报，2008，30(1)：1-23.
LIU Chiyang. Dynamics of sedimentary basin and basin reservoir(ore) forming system[J]. Journal of Earth Sciences and Environment，2008，30(1)：1-23.

[3]曹红霞，李文厚，陈全红，等. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世沉降与沉积中心研究[J]. 大地构造与成矿学，2008，32(2)：159-164.
CAO Hongxia，LI Wenhou，CHEN Quanhong，et al. Center of Late Triassic subsidence and depocenter for the southern Ordos basin[J]. Geotectonica et Metallogenia，2008，32(2)：159-164.

[4]爱德华 A，博蒙特，诺曼 H，等. 油气圈闭勘探[M]. 刘德来，译. 北京：石油工业出版社，2002：84-90.

[5]刘宝和. 中国石油勘探开发百科全书(勘探卷)[M]. 北京：石油工业出版社，2008：135.

[6]王同和. 中国东部含油气盆地的构造迁移[J]. 中国科学：地球科学，1988，18(12)：1314-1322.
WANG Tonghe. The tectonic migration of petroliferous basins of Eastern China[J]. Science China：Earth Sciences，1988，18(12)：1314-1322.

[7]徐秋晨. 济阳坳陷古近系—新近系沉积沉降与断裂关系研究[D]. 西安：西北大学，2013：28-52.

[8]赵延江. 东营凹陷古近系盆地结构与充填特征研究[D]. 广州：中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)，2007：54-73.

[9]漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质，2004，31(1)：15-22.
QI Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology in China，2004，31(1)：15-22.

[10]李理，钟大赉，杨长春，等. 伸展作用序列及其深部背景：以晚中生代以来鲁西隆起和济阳坳陷为例[J]. 地学前缘，2012，19(5)：255-273.
LI Li，ZHONG Dalai，YANG Changchun，et al. Extension order and its deep geological background：Evidence from Western Shandong rise and Jiyang sag in the Late Mesozoic-Cenozoic[J]. Earth Science Frontiers，2012，19(5)：255-273.

[11]史冠中，王华，徐备，等. 南堡凹陷柏各庄断层活动特征及对沉积的控制[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2011，47(1)：85-90.
SHI Guanzhong，WANG Hua，XU Bei，et al. Activity of Baigezhuang fault of Nanpu sag and its controlling on sedimentation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2011，47(1)：85-90.

[12]郑德顺，吴智平，李伟，等. 济阳坳陷中、新生代盆地转型期断裂特征及其对盆地的控制作用[J]. 地质学报，2005，79(3)：386-393.
ZHENG Deshun，WU Zhiping，LI Wei，et al. Faults and their control on the basin during the transfer stage of the Jiyang sag in the Mesozoic，Cenozoic [J]. Acta Geologica Sinica，2005，79(3)：386-393.

[13]史卜庆，吴智平，王纪祥，等. 渤海湾盆地东营运动的特征及成因分析[J]. 石油实验地质，1999，21(3)：196-200.
SHI Boqing，WU Zhiping，WANG Jixiang，et al. A study on the geological characteristics and geodynamic origin of Dongying movement，Bohai Bay basin[J]. Experimental Petroleum Geology，1999，21(3)：196-200.

[14]黄雷，周心怀，刘池洋，等. 渤海海域新生代盆地演化的重要转折期：证据及区域动力学分析[J]. 中国科学：地球科学，

2012,42(6):893-904.

HUANG Lei,ZHOU Xinhuai,LIU Chiyang,et al. The important turning points during evolution of Cenozoic basin offshore the Bohai sea:Evidence and regional dynamics analysis[J]. Science China:Earth Sciences,2012,42(6):893-904.

[15]武守诚.论中国油气盆地的沉积中心问题[J].石油与天然气地质,1987,8(2):201-213.

WU Shoucheng. Discussion on the depocenter of petroliferous basin[J]. Oil & Gas Geology,1987,8(2):201-213.

[16]李素梅,庞雄奇,邱桂强,等.东营凹陷北部陡坡带稠油成藏机理与油气运聚特征[J].地球科学,2004,29(4):456-466.

LI Sumei,PANG Xiongqi,QIU Guiqiang,et al. Oil migration and accumulation mechanisms for heavy oils in north steep slope of Dongying sag,Eastern China[J]. Earth Science,2004,29(4):456-466.

[17]COPLEY A,AVOUAC J P,ROYER J Y. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate:Implications for the forces driving plate motions[J]. Journal of Geophysical Research,2010,115:35-38.

[18]CLIFT D,DEGNAN P J,HANNIGAN R,et al. Sedimentary and geochemical evolution of the Dras forearc basin,Indus suture,Ladakh Himalaya,India[J]. Geological Society of America Bulletin,2000,112(3):450-466.

[19]AITCHISON J C,ALI J R,DAVIS A M. When and where did India and Asia collide? [J]. Journal of Geophiscal Research,2007,112:1-19.

[20]许淑梅,张海洋,张威,等.渤海湾盆地—东海陆架盆地—菲律宾海盆地古近纪沉降中心迁移及其动力学意义[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(2):11-18.

XU Shumei,ZHANG Haiyang,ZHANG Wei,et al. Migration of subsidence centers in the Bohai Bay basin,East China Sea shelf basin and the Philippine sea basin in Paleogene and their geodynamic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2014,34(2):11-18.

[21]张旗.中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? [J].岩石矿物学杂志,2013,32(1):113-128.

ZHANG Qi. Is the Mesozoic magmatism in Eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate? [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica,2013,32(1):113-128.

[22]李三忠,索艳慧,刘鑫,等.南海的基本构造特征与成因模型:问题与进展及论争[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(6):35-53.

LI Sanzhong,SUO Yanhui,LIU Xin,et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China sea:Problems,advances and controversies[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2012,32(6):35-53.

(责任编辑:高丽华)