

任云鹏, 黄颖, 鲁凤婷, 等. 渤海海域渤东低凸起差异演化及控藏作用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(2): 55-61.

REN Yunpeng, HUANG Ying, LU Fengting, et al. Differential evolution of Bodong low uplift in Bohai Sea area and its control over oil and gas accumulation[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(2): 55-61.

渤海海域渤东低凸起差异演化及控藏作用

任云鹏, 黄颖, 鲁凤婷, 王改卫, 朱勇超

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

摘要:以渤东低凸起及其围区钻井和三维地震等资料为基础, 基于断层活动性统计、断裂体系展布特点和构造样式分析以及构造恢复等方法, 恢复了渤东低凸起南北凸起的演化与形成机制。结果表明, 该地区发育 3 期断裂体系, 分别为古新世—始新世断裂系统、渐新世断裂系统以及新近系断裂系统; 渤东低凸起北高南低, 北凸起自古近纪裂陷早幕开始形成, 在东营组沉积时期继续隆升, 形成单断式掀斜垒块; 而南凸起在裂陷早幕开始活动, 抬升幅度相对较低, 东营组沉积时期受郯庐断裂剧烈走滑的影响, 断裂活动强烈, 发育二台阶, 形成双断式地垒; 北凸起边界断层持续活动, 裂陷早幕和晚幕构造叠合较好, 油气顺断层运移到浅层成藏; 南凸起双断式地垒构造, 二台阶断层不直接沟通油源, 在深层形成地层超复型油藏。南北凸起不同的成藏模式对于下一步的油气勘探具有一定的指导意义。

关键词:渤东低凸起; 郯庐断裂; 断裂系统; 差异演化; 油气成藏

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.142

0 引言

在油气勘探的过程中, 凸起构造单元一直都是研究热点。由于凸起本身没有生烃能力, 油气多来源于周围的凹陷区, 但凸起区多具备优越的储盖、圈闭条件, 且是油气运移的有利指向区, 因此凸起区是油气重要的聚集场所, 渤海海域在凸起上已发现众多油气田及含油气构造。近年渤东凹陷周缘蓬莱 9-1 和旅大 27-2 等油气田的发现表明, 凹陷具有优越的生烃潜力和良好的油气勘探前景。渤东低凸起的勘探始于 20 世纪 70 年代^[1], 至今发现商业油田 1 个, 多个含油气构造, 凸起油气显示活跃, 但是没有大的商业发现^[2]。

目前, 对于渤东低凸起的研究大多是针对凸起整体的隆升时间进行的, 很少细分南北凸起的形成差异。王应斌等^[3]研究认为, 渤东低凸起形成时间

较晚, 在东营组二段沉积前, 渤东低凸起早期受东西拉伸, 产生 NE 向西边界断裂, 凸起雏形开始形成。还有学者认为, 渤东低凸起是郯庐断裂在中生代末期的走滑作用形成的^[4]。渤海海域内存在多个凹中隆为沙三段末期受区域挤压反转导致伸展断层发生形成的^[5]。本文结合渤东地区的勘探及研究经历^[6-12], 首次提出南北凸起的差异演化。主要从凸起两侧边界断层及中央走滑断层出发, 研究边界断层、中央走滑断层区域应力性质、活动期次、演化过程, 来厘定渤东低凸起南北的差异演化特征, 并分别针对南北不同的结构特点指出不同的成藏主控因素及勘探方向, 具有指导意义。

1 区域概况

渤东低凸起位于渤海湾盆地东部海域, 夹持于渤中凹陷和渤东凹陷之间, 北面为辽中南洼。主体呈 NNE 走向, 具有南、北 2 个高点, 且北高南低。郯庐走滑断裂从中穿过, 形成了该区复杂的断裂系统。不同性质、方向、期次断裂相互叠加、相互作用, 使渤东低凸起南北两侧经历了复杂的演化过程。凸起西侧边界断裂 F1 为渤东 1 号断裂, 东侧 F2 为

收稿日期: 2020-09-24

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)

作者简介: 任云鹏(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油物探及地质构造分析方面的研究工作。E-mail: renyp@cnooc.com.cn

渤东2号断裂,此外渤东低凸起南侧蓬莱7构造区具有明显的“二台阶”,除渤东1、2号断层外,还发育渤东3、4号断层(图1)。渤东凹陷中央走滑断裂紧密伴生,边界断裂和走滑断裂产状相似,具有明显的走滑性质。

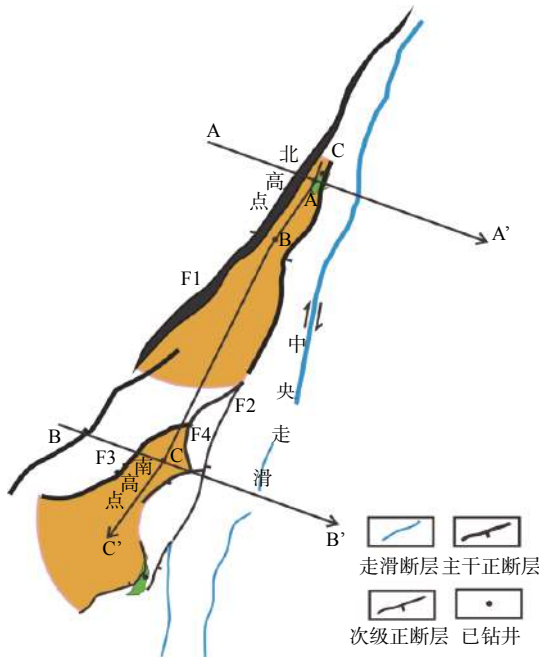


图1 研究区构造纲要图
Fig.1 Structural outline map of the study area

2 渤东低凸起构造特征

2.1 断层活动性

通过统计渤东低凸起边界断裂的断层活动速率(图2),反映了凸起构造活动的时间顺序。

F1是渤东1号断裂,从所统计的断层活动速率峰值上显示其主要活动期为裂陷早幕沙河街组沉

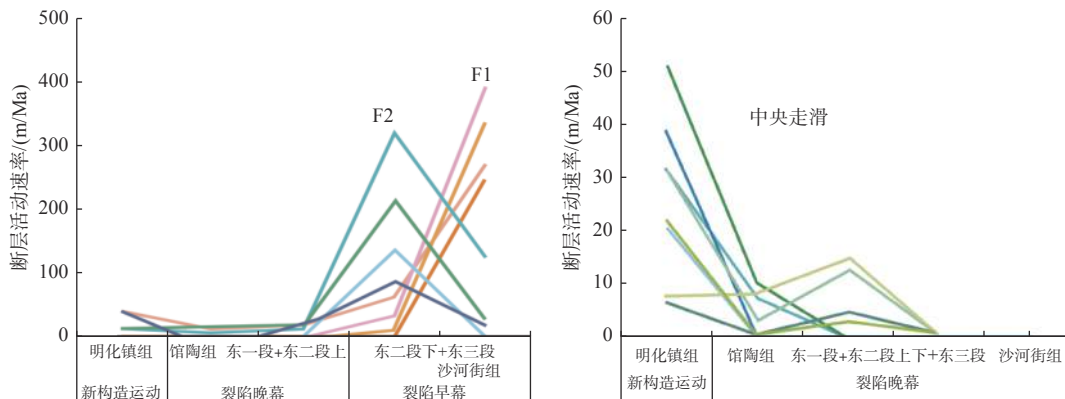


图2 凸起边界断层活动速率
Fig.2 Activity rate of uplifting boundary fault

积时期,到了晚期活动性逐渐减弱趋于平稳;F2是渤东2号断裂,其在早期沙河街组活动并不强烈,主要活动期为东三和东二下时期,活动剧烈,新近系减弱;而中央走滑断裂主要活动期为东营组,新构造运动持续剪切。中央走滑断裂的活动时期最能反映郯庐断裂的活动时期,说明郯庐断裂右旋走滑活动始于渐新世。渤东低凸起边界断裂的活动性为自西向东逐步开始活动。

渤东低凸起受到拉张-走滑区域应力而形成,具有双动力源的构造特征,边界断裂具有走滑性质。断层的活动控制了渤东低凸起的形成,由于郯庐断裂走滑作用,浅层发育大量羽状构造向边界主断裂侧弯收敛。新构造运动时期持续剪切断层持续大量发育,形成复杂的断裂系统。

2.2 断裂特征

受郯庐走滑断裂活动的影响,凸起区发育了3期复杂的断裂系统。不同时期的断裂相互叠加,相互影响构成了渤东低凸起复杂的断裂特征(图2)^[13-14]。

早期古新世-始新世时期。本区受NW-SE向拉张应力场控制,在渤东低凸起边界发育了NNE向向伸展断裂,边界断裂断面连续,控制了低凸起格局。在凸起西侧靠近渤中洼陷内部发育向北掉的EW向断层(图3a);

渐新世沉积时期应力性质发生明显转化,由早期的NW-SE拉张应力转向右旋的剪切应力。两个时期的玫瑰花图表现出,在早期主要发育NNE的断裂,到了渐新世主要发育NEE向的断裂。同时边界断裂主断面断续发育,多条断层向主断面羽状收敛,说明应力性质发生变化,由早期的拉张应力变为剪切应力。在郯庐走滑断裂活动的影响下,早期发育的伸展断裂系统在该时期具有伸展、走滑特

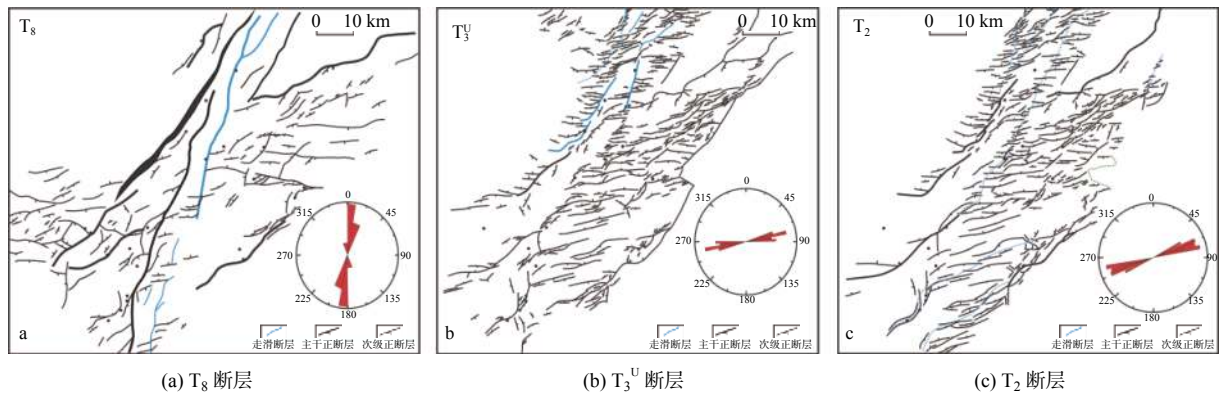


图 3 研究区断裂系统平面图

Fig.3 The fault system in the study area

征, 断裂带一系列的雁列组合能够清晰的反应走滑的构造(图 3b);

新近系沉积时期走滑断裂活动的持续活动、构造活化, 在持续剪切作用下发育了一系列 NEE 向次级断裂雁列组成, 各次级断裂沿主滑动方向弯曲侧接, 形成主断面, 主断面的连通性相对弱, 主要分布在走滑断层的花心部位和凸起边界断层下降盘(图 3c)。

渤东低凸起由拉张、走滑-持续走滑、拉张 3 期应力作用下形成双动力源的构造特征。在这种模式下形成了多种构造样式(表 1)。渤东低凸起北高点渤东 1 号边界断裂发育, 渤东 2 号欠发育, 东部表现为一个缓坡, 整体表现为单断式掀斜垒块的特征; 南高点除了渤东 1、2 号断裂外, 还发育渤东 3 号和渤东 4 号断层, 具有明显的“二台阶”结构特征, 整体表现为双断式地垒的特征, 具有拉张性质。凸起陡坡带形成了复合 Y 字型 and 顺向断块构造, 断裂

组合反应了张扭的构造模式。同时由于走滑应力的作用下, 在中央走滑带形成了花状构造, 具有剪切性质, 形成断背斜圈闭。

3 南北凸起差异演化

3.1 南北凸起地层和断裂活跃性差异

已钻井揭示南北凸起地层差异。A 井位于北凸起, 钻井揭示潜山钻遇前寒武地层, 其上直接覆盖的是东营组地层; 而 C 井位于南凸起, 潜山钻遇中生界火山岩, 其上残留有孔店组地层。说明北凸起隆升时期较早, 缺失古近系早期地层, 南凸起形成时期较晚, 沉积了孔店组地层。南北凸起的连井地震剖面(CC')上的特征显示(图 4), 南凸起 C 井钻井揭示中生界火成岩, 地震上表现为杂乱空白、断续反射, 其下部为中低频、连续强反射特征, 推测应为古生界灰岩地层, 这套地层自南而北向北凸起呈逐渐减薄收敛态势, 到北凸起南侧中生界地层尖灭, 而古生界地层直接超覆在北凸起前寒武之上, 进一步说明北凸起形成的时间更早。

边界断层活跃性差异也能反应南北凸起不同的隆升时期(图 5)。在沙河街组沉积时期, 渤东 1 号断层 F1 南北两侧活动速率较大; 到东营组沉积时期, 北凸起的活动强度依然比较大, 南侧基本停止活动。渤东 2 号断层 F2 沙河街组沉积时期北凸起活动较弱, 南凸起较强; 东营组沉积时期, 南凸起活动速率最大, 同时南凸起控制二台阶的渤东 3 号断层活动加强, 其主要活动时期也是东营组。边界断层活动速率说明北凸起主要隆升期为古近系沉积早期, 南凸起主要的隆起期为东营组沉积时期。

表 1 研究区构造样式

Table 1 Structural styles of study area

| 构造样式及组合 | 平面模式图 | 剖面模式图 | 圈闭类型 | 力学性质 |
|------------|-------|-------|--------|------|
| 单断式掀斜垒块 | | | 断块 | 张性 |
| 双断式地垒 | | | 断块 | 张性 |
| 简单“Y 字型”断层 | | | 断块、断背斜 | 张性 |
| 复合“Y 字型”断层 | | | 断块、断背斜 | 张扭性 |
| 花状构造 | | | 断块、断背斜 | 剪切性质 |

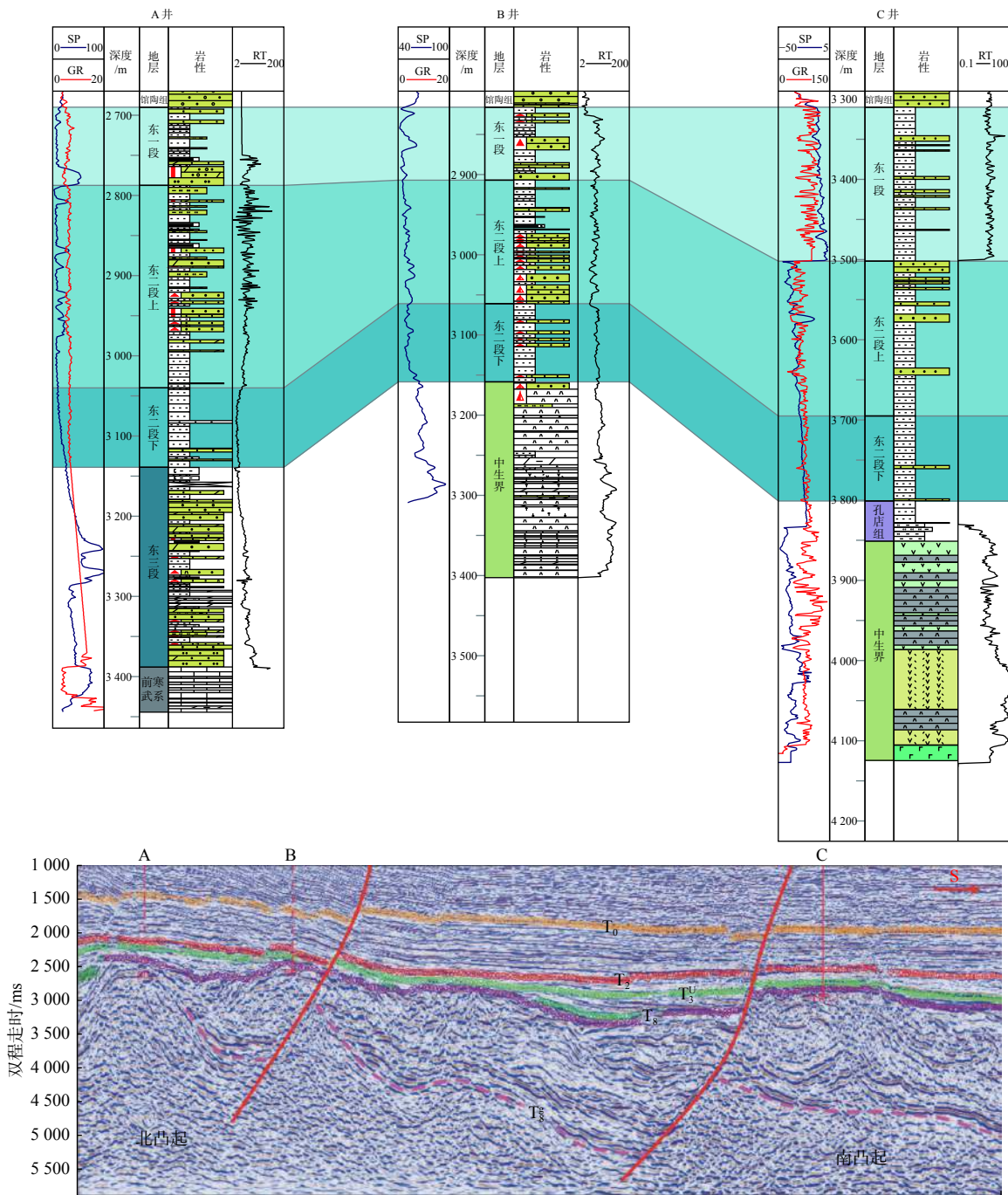


图4 研究区 NS 向连井剖面

Fig.4 North-south well section in the study area

3.2 凸起构造演化

根据构造平衡原理,利用层拉平的回剥方法复原盆地的沉积历史和构造运动过程,编制渤东低凸起南北凸起的构造演化史图(图6),演化过程可以分为3个沉积时期,每个时期凸起南北凸起的构造特征和沉积特征各不相同。

(1) 古近纪裂幕早期

本区受早期喜马拉雅运动的影响,主要应力场

方向为NW-SE向拉张应力,发育伸展断裂。渤东1号断层强烈活动,北凸起抬升,中生界地层遭受剥蚀,前寒武地层直接与东营组地层接触;南凸起抬升幅度相对较低接受沉积,保留了中生界及孔店组地层。断裂的活动性控制了凸起早期的基本构造格局。

(2) 东营组沉积时期

受庐庐右旋走滑活动的影响,渤东1号断层进一步活动,北凸起进一步隆升;南凸起渤东1号断

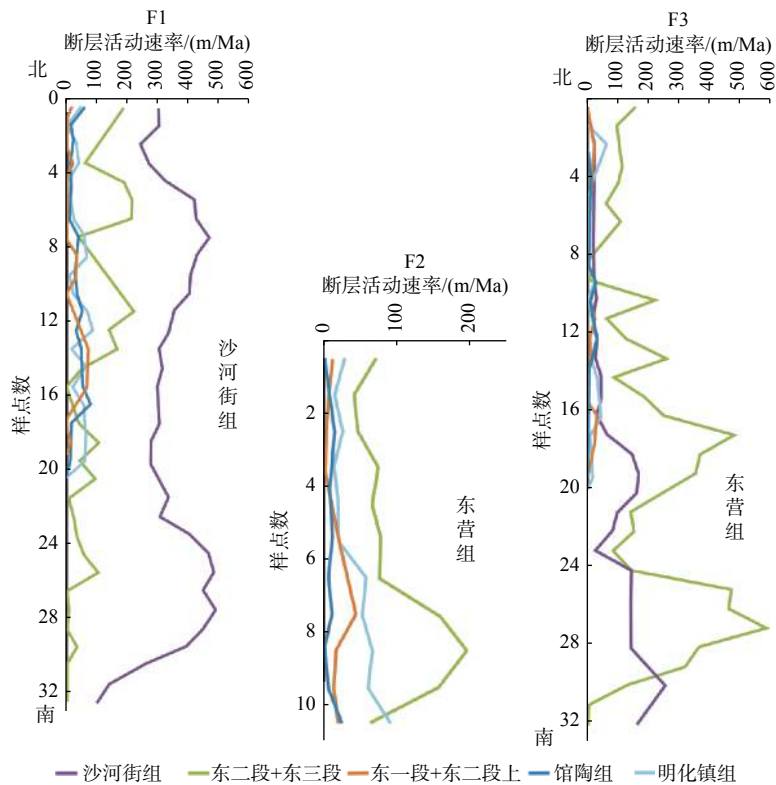


图 5 边界主断裂主要活动时期

Fig.5 Active period of main boundary fault

层停止活动,取而代之的是渤东 2 号断层活动强烈,同时渤东 3 号、4 号断层的发育使南凸起抬升,此时南凸起形成。

(3) 新近系沉积时期

渤东低凸起及围区整体进入坳陷期,受郯庐断裂和新构造运动走滑作用的共同影响,在本区边界断裂和走滑断裂带附近形成花状构造。

4 凸起差异演化对油气成藏的影响

早期张性断层控制了沙河街组沉积,这些断层表现为“早断早衰”,沙河街组沉积末期停止活动;东营组沉积时期走滑派生断层在古近系先存张性断裂的基础上持续发育;新近系沉积时期,走滑断层持续剪切,在边界断层花心和凹陷内部发育了众多浅层断裂。而 3 期断层所起的作用也是不尽相同的:早期张性断层切入凹陷内部,具有沟通油源的作用;东营期断层主要控制了油气的疏导运移和圈闭的形成,具有沟通桥梁的作用;新近系在新构造运动的影响下发育大量断层,控制浅层圈闭的形成(图 7)^[15-16]。

北凸起渤东 1 号边界断层持续发育,断层规模

较大且活动性强,裂陷早幕和晚幕构造及圈闭叠合较好,垂向上油气顺着边界断层及次级断裂向着新近系断块圈闭运移,在明下段形成油气藏,北凸起主要油气发现集中在明下段。北凸起的油气运移模式:边界断层直接切入烃源岩,沟通油源,油气“电梯式”运移至浅层,在新近系断块圈闭中形成构造岩性油气藏(图 8a)^[17]。

南凸起渤东 1 号断层在裂陷早幕开始活动,到东营组沉积时活动减弱;渤东 3 号断层在东营组沉积时期活动强烈,由于断层不直接沟通油源,南凸起含油气层段主要集中在馆陶组。南凸起的油气运移模式:双断式地垒构造,油气“双断式”依据断层、不整合面立体疏导,在深层形成地层超复型油气藏(图 8b)^[18]。南凸起重点放在凸起裙边带,裙边带发育一些断超型的圈闭,在边界断层下降盘发育一些近源扇体,这些近源扇体从剖面上和属性上都有一些异常显示,来自渤中凹陷的油气可以沿着渤东 1 号断层向上运移,形成近源成藏^[19-21]。

5 结论

(1) 渤东低凸起具有伸展、走滑双动力源的构造背景,边界断裂具有走滑性质。北高点为单断式

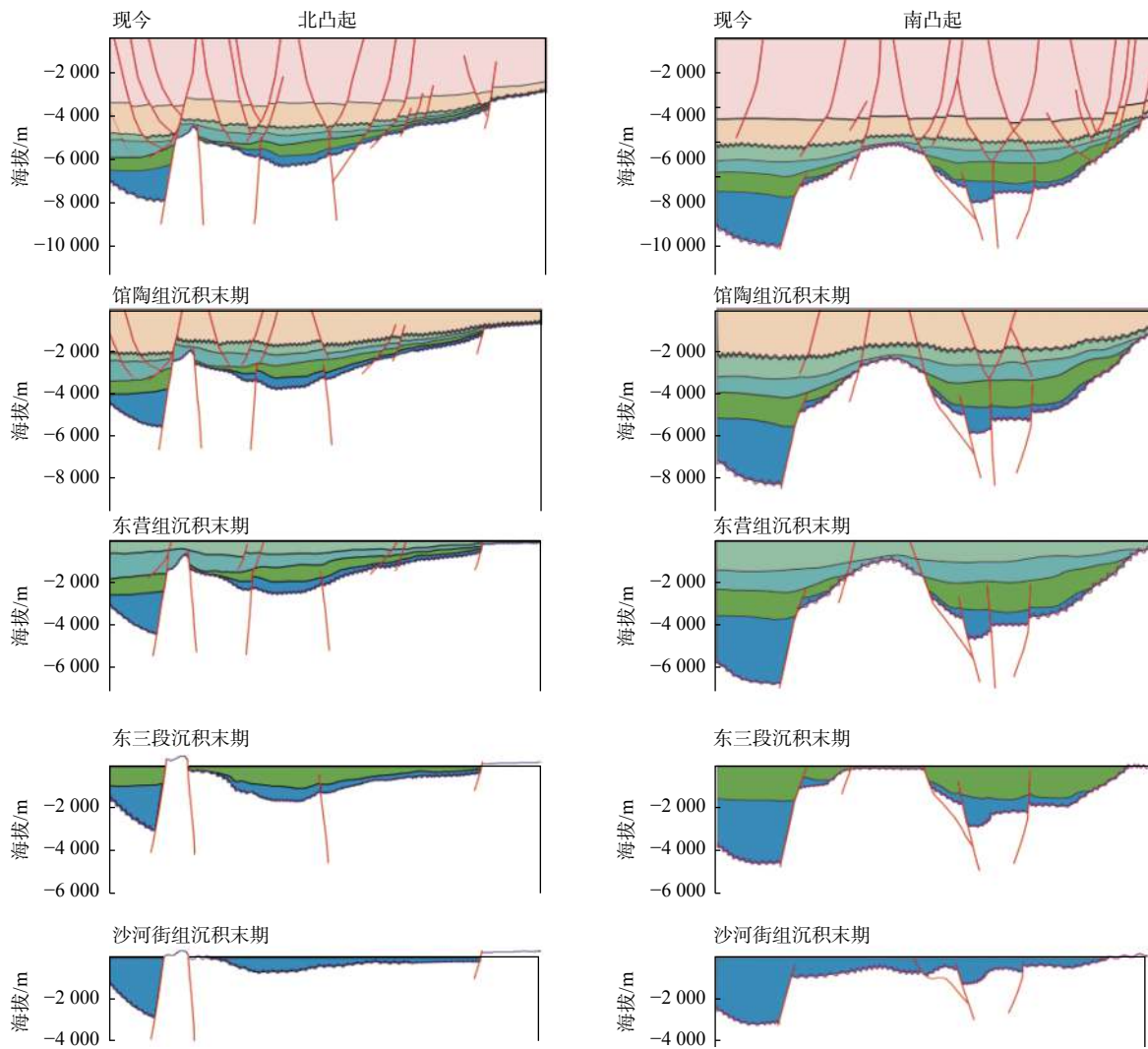


图6 研究区南北凸起构造演化剖面

Fig.6 Structural evolution profiles of the north and south uplift in the study area

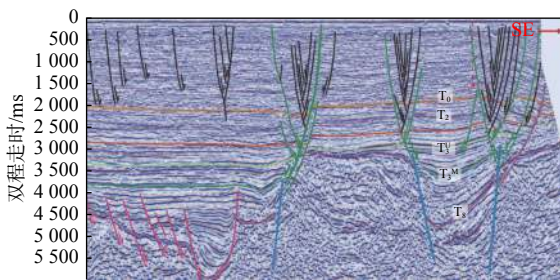


图7 3期断裂系统剖面形态

Fig.7 A section of the Phase 3 fault systems

掀斜垒块,南高点为双断式地垒。

(2)渤东凸起的隆升有2期,第1期为裂陷早幕,为地垒建造期,北凸起形成;第2期为裂陷晚幕,在郯庐断裂剧烈走滑的控制下,南凸起形成。

(3)渤东低凸起的边界断层活动控制了下一步勘探方向:北凸起在浅层寻找构造岩性油气藏;南凸起寻找深层的地层超覆型油藏。

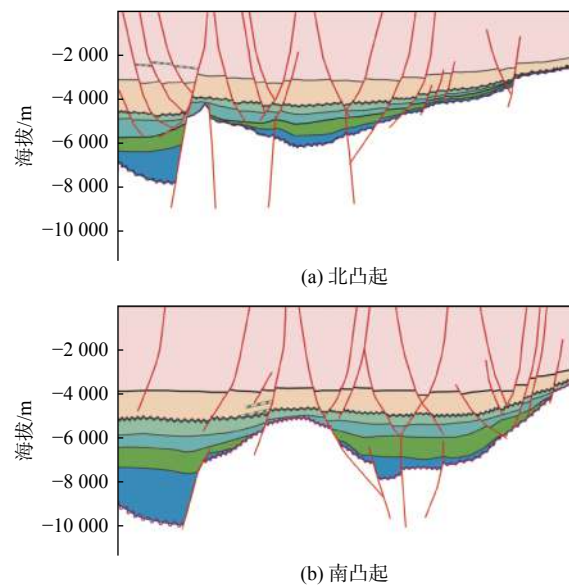


图8 研究区南北凸起油藏模式

Fig.8 Reservoir models of the north and south uplifts in the study area

参考文献:

- [1] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郯庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 1-10.
- [2] 周毅, 张通彩, 何仕斌, 等. 渤中、渤东凹陷结构认识及有利勘探方向[J]. *中国海上油气(地质)*, 1997, 11(6): 432-438.
- [3] 王应斌, 王海军, 孙和风. 渤东低凸起构造演化及成藏条件[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(2): 151-158.
- [4] 葛建党. 郯庐断裂在渤中凹陷的构造特征与油气成藏的关系[J]. *海洋石油*, 2001, 107(1): 14-20.
- [5] 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(D辑): 地球科学*, 2012, 42(6): 893-904.
- [6] 吴智平, 薛雁, 颜世永, 等. 渤海海域渤东地区断裂体系与盆地结构[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(3): 463-471.
- [7] 周毅, 张通彩, 何仕斌, 等. 渤中、渤东凹陷结构认识及有利勘探方向[J]. *中国海上油气(地质)*, 1997, 11(6): 432-437.
- [8] 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): 15-21.
- [9] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程[J]. *石油实验地质*, 1995, 17(4): 316-323.
- [10] 陈凯, 漆家福, 刘震, 等. 渤海海域渤东地区新生代断裂特征及对油气的控制[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(1): 63-71.
- [11] 万桂梅, 汤良杰, 周心怀, 等. 郯庐断裂带在渤海海域渤东地区的构造特征[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 342-346.
- [12] 张参, 官大勇, 王明臣, 等. 渤海海域渤东低凸起中南段构造演化与油气成藏[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(6): 68-75.
- [13] 江涛, 黄晓波, 李慧勇, 等. 渤西伸展背景下先存-新生断裂体系特征及控藏作用[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 27-34.
- [14] 王国纯. 郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造[J]. *中国海上油气(地质)*, 1998, 12(5): 289-295.
- [15] 黄志, 李慧勇, 李新琦, 等. 渤中西南洼槽演化特征及生烃潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 45-51.
- [16] 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复——以渤东低凸起南端为例[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(4): 18-25.
- [17] 宿雯, 杨海风, 揣媛媛, 等. 渤海南部缓坡带新近系油气运移模式——以垦利 9 油田群为例[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 69-76.
- [18] 杨传超, 张新涛, 郭涛, 等. 渤海海域石东斜坡带“双断-接力”油气运移模式及勘探实践[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(5): 49-56.
- [19] 岳军培, 黄晓波, 刘朋波, 等. 断裂凸面脊的刻画及“源-断-圈”耦合控藏作用: 以庙西南凸起南侧边界为例[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 32-38.
- [20] 邓运华. 郯庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作用[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(5): 1-5.
- [21] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. *石油学报*, 2001, 22(4): 293-296, 303.

Differential evolution of Bodong low uplift in Bohai Sea area and its control over oil and gas accumulation

REN Yunpeng, HUANG Ying, LU Fengting, WANG Gaiwei, ZHU Yongchao

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Based on the drilling and 3D seismic data collected from the Bodong low uplift and its surrounding areas, we studied in this paper the forming process of Bodong low uplift by means of fault systems, structural styles, fault activities and balanced profiles, and its control over hydrocarbon accumulation was also discussed. Three fault systems are found well developed in the area, namely, the Paleocene-Eocene fault system, the Oligocene fault system and the Neogene fault system. The Bodong low uplift is high in the north and low in the south in an overview. The north high started rising up in early Paleogene and continued through the whole period of Dongying Formation, and as the result a single fault tilting barrier was formed. The south uplift was activated in the early stage of the rifting, and the uplifting range was relatively small. During the depositional period of the Dongying Formation, the Tanlu fault suffered a strong strike-slip move, which caused the formation of a double-fault horst. The boundary faults of the north uplift kept active, and the early and late episodes of the rift well overlapped. Oil and gas may migrate along faults to shallower reservoirs. In the double-fault horst of the south uplift, the two-step faults do not connect directly to the oil source, and thus an overlapping stratigraphic reservoir formed in the deep layer. It is believed that different reservoir-forming models on the north and south uplifts have certain guiding significance for future oil and gas exploration.

Key words: Bodong low uplift; Tanlu fault; fracture system; differential evolution; oil and gas accumulation