

济阳坳陷地震泵作用与新近系大油田高效形成

罗霞^{1,2}, 朱筱敏¹, 方旭庆³, 林德猛²

(1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257015;
3. 中国石化胜利油田分公司勘探处, 山东东营 257001)

摘要:依据钻井、地球化学和油藏分析等资料,通过济阳坳陷断层-扇体组合样式和不同断层-扇体组合样式地震泵作用效率差异的分析,对济阳坳陷地震泵作用与新近系大油田高效形成进行研究。结果表明:济阳坳陷断层-扇体配置主要形成独立断层型、断层-扇体线接触型和断层-扇体面接触型 3 种组合样式;在地震作用开启及高压→浮力转换驱动下,油气沿断层-扇体线接触型组合呈“活塞式”运移充注,地震泵作用效率高,独立断层型和断层-扇体面接触型组合地震泵作用效率低;济阳坳陷沾化地区普遍发育断层-扇体线接触型组合,其主要成藏期、地震泵作用期与新近系大型披覆构造圈闭定型期“三期”良好耦合,约 2 Ma 高效形成了孤岛油田等一批新近系亿吨级油田。

关键词:济阳坳陷;断-扇配置;新近系;地震泵作用;高效成藏

中图分类号:TE 121.1

文献标志码:A

Relationship between seismic pumping and big oilfield formation of Neogene in Jiyang Depression

LUO Xia^{1,2}, ZHU Xiao-min¹, FANG Xu-qing³, LIN De-meng²

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Geophysical Exploration Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;
3. Exploration Division of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257001, China)

Abstract:Based on drilling, geochemical and reservoir analysis data, the relationship between the seismic pumping and the big oilfield formation of Neogene in Jiyang Depression was studied through the analysis of fault-fan configuration styles and their differences in seismic pumping efficiency in the depression. The results show that three fault-fan configuration styles include independent fault type, fan-fault line contact type and fan-fault surface contact type. Driven by the conversion of high pressure to buoyancy, oil and gas migrate and infill-inject like ‘Piston’ along the fan-fault line contact type of source fault when the seismic pumping occurs. Hydrocarbon accumulation efficiency of ‘Piston’ migration is the highest pattern. Independent fault type and fan-fault surface contact type of source fault are inefficient vertical migration patterns. The good coupling of major accumulation period, seismic pumping action period and large drape structures formation period account for the formation of million-ton Neogene oilfields such as Gudao Oilfield, Gudong Oilfield and Chengdao Oilfield in Zhanhua area in 2 Ma.

Key words:Jiyang Depression; fault-fan configuration; Neogene; seismic pumping; high-efficiency hydrocarbon accumulation

济阳坳陷位于渤海湾盆地东南隅,东邻郯庐断裂带,受郯庐断裂印支期左旋走滑运动和燕山—喜山期右旋走滑运动影响^[1-4],本区具有经历多次构造运动叠加、断裂呈网状展布的特点,并且新近纪成藏期以来古近系沙河街组普遍发育异常

高压^[5-6],按照地震泵作用^[7-9]的认识,易于油气在浅部层系聚集。但勘探实践表明,济阳坳陷不同区带浅部层系油气分布差别很大^[10-11],沾化凹陷多发育新近系大型油气田,新近系探明石油地质储量占总探明储量近 80%,东营凹陷、车镇凹陷和

收稿日期:2013-10-16

基金项目:国家重大油气专项(2011ZX05006)

作者简介:罗霞(1973-),女,高级工程师,博士研究生,主要从事油气勘探研究工作。E-mail:292947193@qq.com。

惠民凹陷以古近系沙河街组为主要含油层系,新近系仅发现小规模油气藏,所以明确地震泵作用下新近系油气分布的差异性,对于深刻认识新近系油气成藏机制和指导类似地区的油气勘探具有积极意义。笔者依据济阳拗陷大量的勘探实践资料,对济阳拗陷地震泵作用与新近系大油田高效形成进行研究。

1 地震泵作用分析

1.1 地质背景

济阳拗陷新生代经历了古近纪断陷期和新近纪拗陷期的演化过程,不同走向断层的演化和叠加形成了沾化、东营、车镇和惠民 4 个凹陷,呈现出“多凸多凹、凹凸相间”的构造格局(图 1),古近系主要分布在各凹陷中,新近系遍布全区,并在古近纪末期的凸起上形成了披覆构造。

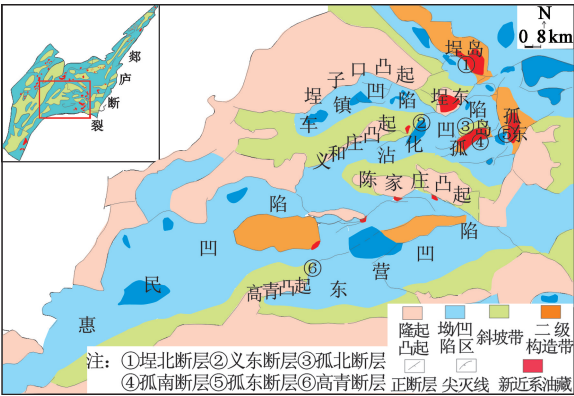


图 1 济阳拗陷构造单元划分及新近系油气分布
Fig.1 Tectonic units and hydrocarbon distribution of Neogene in Jiyang Depression

古近系自下而上发育孔店组、沙河街组的沙四段、沙三段、沙二段、沙一段和东营组,其中沙河街组沙四段和沙三段为深湖相沉积,各凹陷均大面积分布,是本区最主要烃源岩层系。新近系自下而上发育馆陶组和明化镇组,馆陶组下部(馆下段)以辫状河沉积为主,馆陶组上部(馆上段)为低弯度河→曲流河→泛滥平原的砂泥岩互层,馆上段上部发育一套 100 ~ 150 m 泛滥平原相稳定泥岩段,是一套良好的区域封盖层(图 2)。

新近系已发现油气主要赋存在馆上段下部,油气来自下伏古近系沙河街组沙四—三段,古近系生油层和新近系产层相距 1500 ~ 2000 m,油气纵向运移通道是控制新近系成藏的关键因素。

1.2 断层-扇体配置关系

1.2.1 要素分析

古近纪-新近纪断陷盆地影响油气纵向运移主

要有断层和扇体^[12]两种要素。

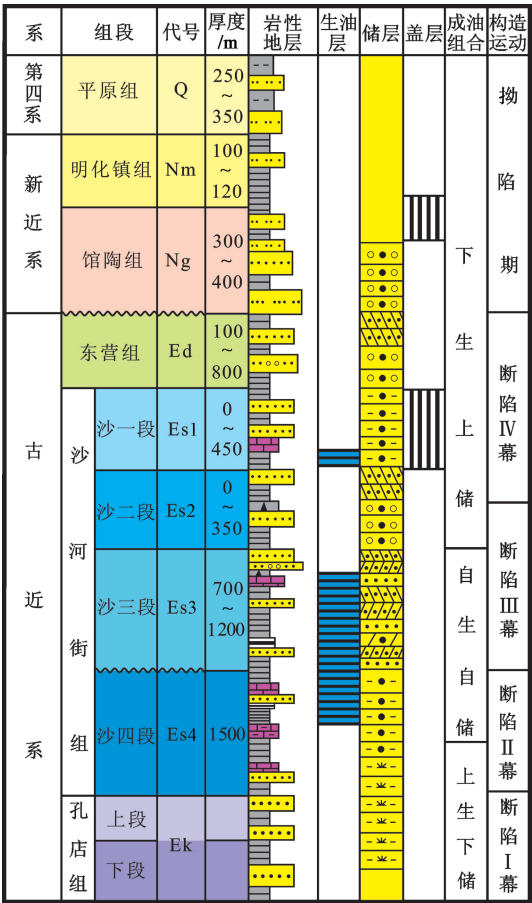


图 2 济阳拗陷新生界综合柱状图
Fig.2 Cenozoic composite column of Jiyang Depression

断层无疑是油气纵向运移的最主要通道,济阳拗陷古近系—新近系发育的北东向、近东西向和北西向 3 组正向断层在区域应力场扭张和引张的作用下,多数断层从古近纪→新近纪持续活动,成为沟通源—圈的有利通道。

伴随着断层的活动,断层下降盘一般发育扇体,大规模凸起区的下降盘持续发育扇体,三维空间上扇体和断面呈“面”依附的关系;规模较小的凸起主要在断陷早期(如沙四—沙三期)提供短暂的物源,在下降盘发育早期小型扇体,后期基本不发育扇体,三维空间上扇体和断面呈“线”依附的关系;还有一类凸起边界断层具有强烈走滑性质,下降盘几乎不发育扇体。

1.2.2 断层-扇体组合样式及分布

依据扇体和断层的空间依附关系,组合样式可划分为 3 种类型(图 3): I 型是断层-扇体“面接触型”,主要分布在大型凸起的周缘,如东营北带陈南断层和车镇北带断层等; II 型是断层-扇体“线接触型”,主要分布在中小型凸起的周缘,如沾化地区的

孤北断层、孤南断层、埕北断层和孤东断层等;Ⅲ型是独立断层型,如沾化地区的义东断层和东营地区

高青断层等。

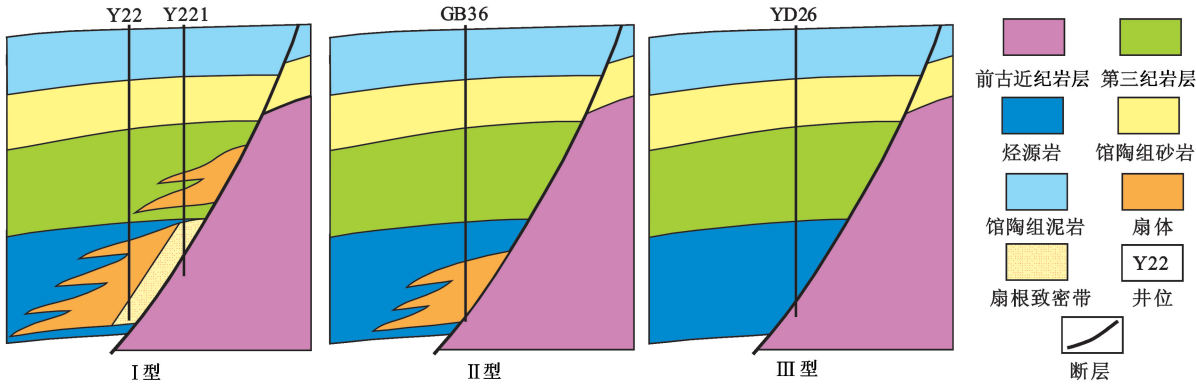


图3 济阳拗陷断层-扇体组合样式

Fig.3 Fault-fan configuration styles in Jiyang Depression

1.3 地震泵作用差异分析

1.3.1 地震作用分析

济阳拗陷东边界的郯庐断裂带是近代地震活跃带^[13],在有地震记录的100 a内,该带7级以上地震发生过4次^[14-15],以这样的频率计算,济阳拗陷主成藏期以来到现在(约10 Ma)大于7级的地震可能发生40万次以上。在地震作用下,断层呈间歇式开启,控制了油气的纵向运移和新近系的成藏。

1.3.2 地震泵作用过程

按照油气在断层-扇体组合中的行进状态,每个地震泵作用过程可以大致划分为以下3个阶段(图4):

初始积累阶段(图4(a)):该阶段断层处于休眠期,突出了下降盘扇体在油气运移中的重要作用,依据大量勘探实践认为,断层下降盘扇体、特别是烃源岩附近的扇体是油气初始积累的充分条件(Ⅰ型和Ⅱ型组合都具备),这些扇体与烃源岩呈“指状”

大面积接触,在烃源岩层异常高压孔隙流体压力的压力差和扩散流作用下,油气自烃源岩向扇体运移聚集,扇体成为油气初次聚集的场所。

快速转移阶段(图4(b)):地震作用的断层开启使断层破碎带中流体压力下降,产生相对负压的抽吸作用,断层周围的流体、特别是已储集在断层下方扇体中的油气具有较大流体压力,高压驱动油、气、水混相向断层快速运移;断层上方的流压已经释放,新近系圈闭为常压系统,储(新近系圈闭)源(沙河街组)之间剩余压力差为15~25 MPa,压力差为油气向上定向输送提供强大动力。流体在断层上升过程中,由于压力降低,溶解于水中的油气易于从水中分离出来,同时受浮力作用上移。整个过程油气在高压→浮力转换驱动下以管流(甚至是涌流)形式向上转移,效率较达西流和扩散流具有速度快、效率高的特点。

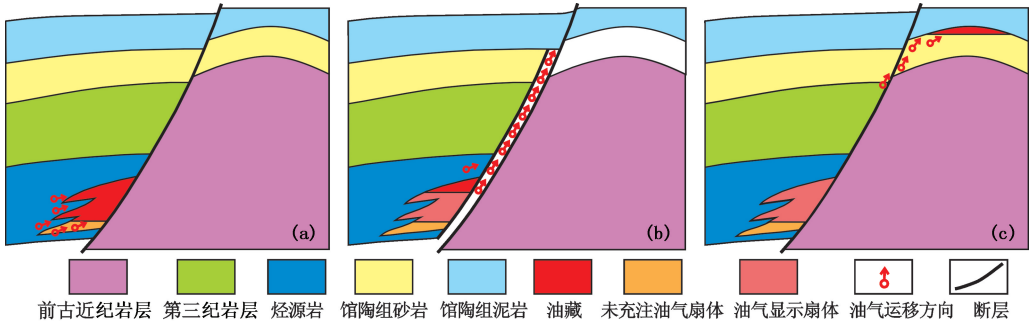


图4 济阳拗陷地震泵作用过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of seismic pumping process in Jiyang Depression

充注聚集阶段(图4(c)):油气沿断层快速上升遇到新近系馆陶组上段良好封盖层借势进入到上升盘新近系披覆构造圈闭中,完成一次油气充注和

聚集。随着地震间歇断层活动减弱和运移流体促使矿物的沉淀,造成断层渗透率降低,流动减慢乃至停滞,断层重新进入休眠期,进入下一个油气初始积累

阶段。这样,地震间歇期进行油气初始积累,地震活动期油气快速运移和充注聚集,如此反复造成油气汇聚和排泄周期性进行,引起油气的幕式运移和幕式充注。

1.3.3 地震泵作用效率分析

断层-扇体组合样式控制地震泵作用效率。

(1)断层-扇体面接触型:起初始积累作用的早期扇体规模一般比较大、相带分区明显,扇根往往形成致密封堵层,在快速转移阶段,初始积累的油气难以通过扇根进入断面,通常此类扇体的扇中和扇端部位油气富集。即使部分油气进入断层纵向运移,由于断层中部和上部扇体形成的圈闭对油气起到截流或者分流作用,进入新近系的油气少,地震泵作用效率低,与其沟通的新近系圈闭成藏不利。如东营北带断层上升盘的陈家庄披覆构造和车镇北带断层上升盘的埕子口披覆构造,虽然发育完整背斜圈闭并有断层沟通凹陷,但是没有发现油气,就是典型的实例。

(2)断层-扇体线接触型:扇体规模较小、相带不明显,整体物性较好,扇体内初始积累的油气在快速转移阶段可以顺畅地进入断层,并纵向运移到新近系圈闭中,地震泵作用效率高,与其沟通的新近系圈闭易于油气大规模聚集。沾化凹陷的孤岛凸起、孤东凸起、埕东凸起和埕岛凸起属于该类型,凸起上披覆构造形成亿吨级规模的油气聚集。

(3)独立断层型:该类断层虽然深入到烃源岩内,断层伴生裂缝可以改善深部附近岩层的物性,但其创造的储集空间很少,缺乏足够的接触面积吸取烃源岩生成的油气。断层下部油气供给量先天不足,所以地震泵作用效率低,与其连接的新近系圈闭不易规模成藏。如高青凸起和义和庄凸起分别通过高青断层和义东断层与深洼相接,但仅在义东凸起发现零星的油气藏。

2 新近系大油田高效形成实例解剖

2.1 孤岛油田基本特征

孤岛油田位于沾化凹陷中部的孤岛凸起上(图1),南北分别以孤南断层和孤北断层与孤南洼陷和渤南-孤北洼陷相连,圈闭面积约为100 km²,其基底由古生界奥陶系、石炭—二叠系和中生界组成,新近系披覆于古凸起之上形成大型披覆背斜构造,馆陶组顶部130~150 m 稳定泥岩封盖段决定了披覆构造成为油气聚集的优质场所(图5)。孤岛油田新近系馆陶组已探明石油地质储量4.12×10⁸ t,地化指标证实,油气主要来自北部的渤南洼陷和南部的

孤南洼陷^[16-17]。

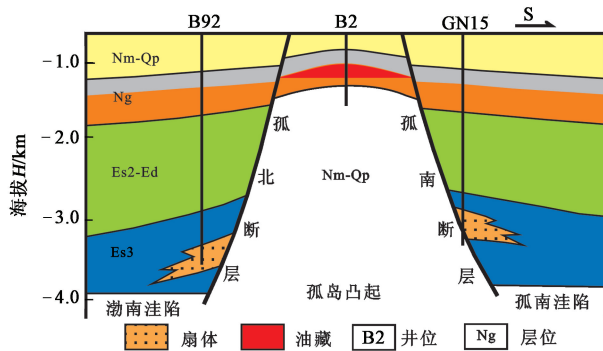


图5 孤岛油田近南北向油藏剖面

Fig.5 North-south reservoir section of Gudao Oilfield

2.2 成藏过程分析

孤岛油田的源岩区北部渤南洼陷和南部孤南洼陷在东营末期有一个短暂的成藏过程(图6),以常压系统为主,由于喜山运动东营幕的抬升作用,成藏过程很快结束。进入成藏间歇期(24~10 Ma),该阶段新近系没有沉积,对新近系成藏无效。新近纪中期(10 Ma)开始新一轮成藏期,源岩区进入排烃持续高峰期和异常高压阶段(明化镇期渤南洼陷沙三下段顶部压力系数达到1.6,孤南洼陷沙三下段顶部压力系数达到1.4),形成了油气强大的运移动力,加快了油气的排出和聚集,该阶段油气聚集量约占总量的85.3%(图7)。

新近系圈闭油气有效聚集应发生在馆陶组上部泥岩盖层形成封闭能力以后,根据胜利油田试验分析成果可知,馆陶组顶部的孔隙度大于20%,渗透率为 $(10^{-4} \sim 10^{-6}) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙半径平均值为30 nm,突破压力小于10 kPa,属于低压突破型盖层。当油藏剩余压力(Δp)小于盖层突破压力时,就会发生油气聚集。孤岛油田浅层油气藏剩余压力多小于5 kPa^[16],统计资料表明此时泥岩的埋深应为700~900 m,在新近系明化镇中期形成有效圈闭(约4 Ma)。在油气不断充注聚集造成油藏剩余压力增加的同时,上覆层明化镇组0.1 mm/a 沉积速率^[18]决定了盖层封堵性能不断变好,始终能够保持盖层突破压力大于油藏剩余压力。

作为南北两套油源纵向通道的孤南和孤北断层属于断层-扇体线接触型断层,古近纪以来持续活动,新近纪末期逐渐消亡(图6),按照圈闭形成时刻(约4 Ma)到新近纪末期(约2 Ma),断层有效运移时间约2 Ma,期间因7级以上地震造成断层开启次数可能达数万次;孤南断层和孤北断层50°~70°高倾角决定了其断层面上正压力小,在断层开启期间,断层下部连接深部具较高流体压力的扇体,上部

连接馆陶组圈闭,在源—储剩余压力差(渤南洼陷 20.2 ~ 23.7 MPa,孤南洼陷 13.6 ~ 14.5 MPa)和浮力的驱动下,两条断层仿佛“活塞式”抽水机将断层下降盘底部扇体的油气向新近系圈闭定向、高效充注;这点从断层下降盘扇体丰富的油气显示中也可以得到证明,如孤北断层下降盘 B92 井在沙三段扇体钻遇油斑砂岩厚度大于 80 m,试油全为水层;孤

南断层下降盘的 GN15 等井沙三段扇体中见到了油斑、油迹等砂岩显示,没有形成商业油藏,明显是“过路油”特征,应是原已形成的油藏因断层活动抽汲作用遭到破坏。

孤岛披覆构造周围源岩区主成藏期、地震泵作用高效期和圈闭定型期“三期”的良好耦合在约 2 Ma 在孤岛披覆构造形成 4.12×10^8 t 油气聚集量。

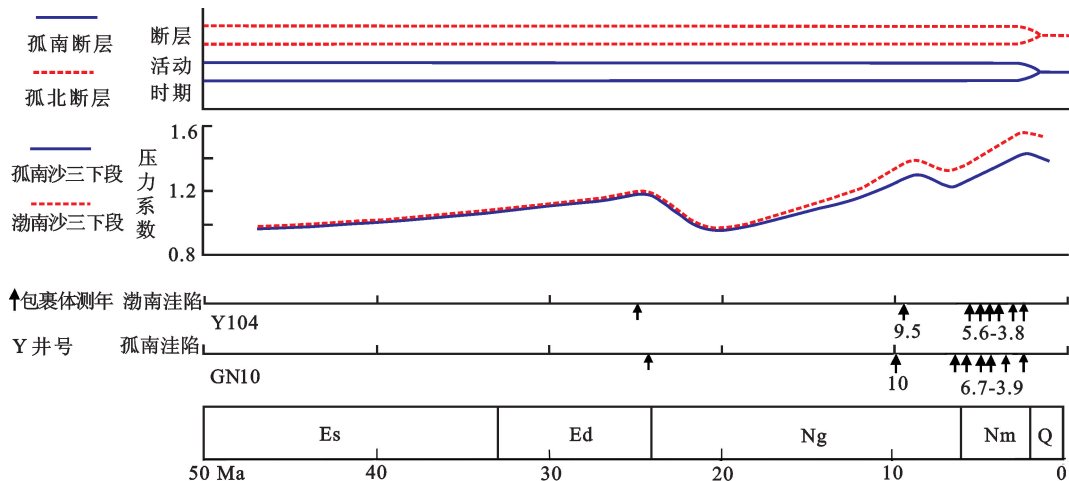


图6 孤岛油田成藏事件图

Fig. 6 Accumulation events map of Gudao Oilfield

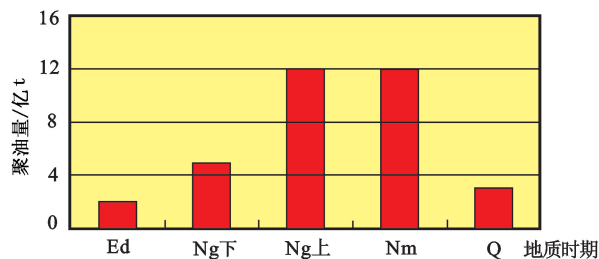


图7 沾化凹陷不同时期油气聚集量

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation amount of different periods in Zhanhua sag

3 结论

(1) 济阳拗陷断层—扇体配置主要形成独立断层型、断层—扇体线接触型和断层—扇体面接触型3种组合样式。

(2) 在地震作用开启及高压→浮力转换驱动下,油气沿断层—扇体线接触型通道呈“活塞式”运移充注,地震泵作用效率高,独立断层型和断层—扇体面接触型通道地震泵作用效率低。

(3) 济阳拗陷沾化地区普遍发育断层—扇体线接触型组合,其主要成藏期、地震泵作用期与新近系大型披覆构造圈闭定型期“三期”的良好耦合,约 2 Ma 高效形成了孤岛油田等一批新近系亿吨级油田。

致谢 论文完成过程中得到胜利油田地质科学

研究院程付启博士后的帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 吴智平,李伟,任拥军,等. 济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J]. 地质学报, 2003,77(2):280-286.
WU Zhi-ping, LI Wei, REN Yong-jun, et al. Basin evolution in the Mesozoic and superposition of Cenozoic basin in the area of the Jiyang depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2003,77(2):280-286.
- [2] 杨少春,齐陆宁,李拴豹. 埕岛地区埕北 20 潜山带裂缝类型、发育期次及控制因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(5):1-6.
YANG Shao-chun, QI Lu-ning, LI Shuan-bao. Fracture types, development phases and controlling factors of Chengbei 20 buried hills in Chengdao area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(5):1-6.
- [3] 方旭庆,蒋有录,石砥石. 济阳拗陷沾化地区断裂特征及其与成藏要素和油气分布的关系[J]. 油气地质与采收率,2012,19(2):1-4.
FANG Xu-qing, JIANG You-lu, SHI Di-shi. Relationship between characteristics of faults and hydrocarbon distribution in Zhanhua area, Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(2):1-4.
- [4] 李伟,吴智平,张明华,等. 埕岛地区中生代和新生代

- 断层发育特征及其对沉积的控制作用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):1-6.
- LI Wei, WU Zhi-ping, ZHANG Ming-hua, et al. Development characteristic of Mesozoic and Cenozoic faults and its control over deposition in Chengdao area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(1):1-6.
- [5] 刘震,戴立昌,赵阳,等. 济阳拗陷地温-地压系统特征及其对油气藏分布的控制作用[J]. 地质科学,2005,40(1):1-15.
- LIU Zhen, DAI Li-chang, ZHAO Yang, et al. Characteristics of geotemperature-pressure systems and their controlling function on pools distribution in the Jiyang depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2005,40(1):1-15.
- [6] 许晓明,刘震,谢启超,等. 渤海湾盆地济阳拗陷异常高压特征分析[J]. 石油实验地质,2006,28(4):345-349.
- XU Xiao-ming, LIU Zhen, XIE Qi-chao, et al. Over-pressure characteristics in the Jiyang depression, the Bohaiwan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006,28(4):345-349.
- [7] SIBSON R H, MC MOORE J, RANKIN A H. Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism[J]. Journal of Geology Science, 1975,131(6):653-660.
- [8] HOOPER E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991,4(2):161-180.
- [9] 华保钦. 构造应力场、地震泵和油气运移[J]. 沉积学报,1995,13(2):77-85.
- HUA Bao-qin. Stress field, seismic pumping and oil-gas migration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995,13(2):77-85.
- [10] 罗霞. 垦东-桩海潜山披覆构造带油气分布规律及主控因素[J]. 石油天然气学报,2008,30(3):36-39.
- LUO Xia. Hydrocarbon distribution rule and its main controlling factors in Kendong-Zhuanghai buried hill draping structure[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(3):36-39.
- [11] 方旭庆,蒋有录,罗霞,等. 济阳拗陷断裂演化与油气富集规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(2):21-27.
- FANG Xu-qing, JIANG You-lu, LUO Xia, et al. Relationship between faults evolution and hydrocarbon enrichment in Jiyang depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(2):21-27.
- [12] 邓运华. 断裂-砂体形成油气运移的“中转站”模式[J]. 中国石油勘探,2005,6:14-17.
- DENG Yun-hua. Transfer station model of oil-gas migration formed by fault-sandbody[J]. China Petroleum Exploration, 2005,6:14-17.
- [13] 王小凤,李中坚,陈柏林,等. 郑庐断裂带[M]. 北京:地震出版社,2000:350-351.
- [14] 邹华耀,龚再升,滕长宇,等. 渤中拗陷新构造运动断裂活动带 PL19-3 大型油田晚期快速成藏[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(4):482-492.
- ZOU Hua-yao, GONG Zai-sheng, TENG Chang-yu, et al. Late-stage rapid accumulation of the PL19-3 giant oilfield in an active fault zone during Neotectonism in the Bozhong depression, Bohai Bay[J]. Sci China Earth Sci, 2011,41(4):482-492.
- [15] 龚再升. 中国近海新生代盆地至今仍然是油气成藏的活跃期[J]. 石油学报,2005,26(6):1-6.
- GONG Zai-sheng. Cenozoic China offshore basins keeping active hydrocarbon accumulation to present[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(6):1-6.
- [16] 陈建渝,牛瑞卿. 断陷盆地多次运移成藏的有机地球化学研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2000,25(3):253-259.
- CHEN Jian-yu, NIU Rui-qing. Organic geochemistry research into multiphase petroleum migration and accumulation in rift subsidence basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000,25(3):253-259.
- [17] 王忠. 孤岛油田馆陶组含油层系多源供烃判识及成藏分析[J]. 天然气地球科学,2011,22(3):399-406.
- WANG Zhong. Oil sources in multi-directions and accumulation analysis in Guantao formation of Gudao Oilfield in Zhanhua sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2011,22(3):399-406.
- [18] 张善文,王永诗,石砥石. 网毯式油气成藏体系:以济阳拗陷新近系为例[M]. 东营:中国石油大学出版社,2008:8-12.

(编辑 徐会永)