

饶阳凹陷肃宁地区新生代断裂活动及其 对油气成藏的控制作用

邓爱居¹, 张少华^{2,3*}, 李凤群¹, 雷志斌³, 黄志佳¹, 李其瑞¹, 李运娥¹

(1. 中国石油华北油田分公司 第三采油厂, 河北 沧州 062450; 2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 断裂活动对裂陷盆地的形成、演化及油气成藏具有重要影响。利用渤海湾盆地饶阳凹陷肃宁地区的三维地震数据及钻井、测井资料分析新生代断裂活动性, 并在此基础上探讨断裂活动对油气成藏的控制作用。研究表明, 肃宁地区新生代的断裂活动具有明显的阶段性; 古近纪可分为孔店组—沙四段沉积时期、沙三段—沙二段沉积时期、沙一段—东营组沉积时期共3期由弱变强的断裂活动幕, 其中沙三段—沙二段沉积时期和沙一段—东营组沉积时期为研究区构造活动最强烈的2期断裂活动幕; 新近纪以来, 研究区仅在明化镇组沉积早期发生断裂微弱活动。肃宁地区新生代的断裂活动对油气成藏具有重要的控制作用, 主要表现为古近纪最强烈的2期断裂活动幕形成2套优质烃源岩, 强伸展作用控制富烃洼槽的形成, 断裂演化过程控制潜山圈闭的发育与定型, 并影响沉积体系的演化与砂体展布。受断裂活动的控制, 研究区发育新生古储型断裂—不整合侧向供烃成藏模式和新生新储型多期充注混源成藏模式。

关键词: 断裂活动 油气成藏 新生代 饶阳凹陷 渤海湾盆地

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)03-0018-07

Cenozoic fault activity and its control on hydrocarbon accumulation in Suning area of Raoyang sag, Bohai Bay Basin

Deng Aiju¹, Zhang Shaohua^{2,3*}, Li Fengqun¹, Lei Zhibin³, Huang Zhijia¹, Li Qirui¹, Li Yun'e¹

(1.No.3 Oil Production Plant, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Cangzhou City, Hebei Province, 062450, China; 2.State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710069, China; 3.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Fault activities has a profound influence on the formation and evolution of rift basin and hydrocarbon migration and accumulation. Cenozoic fault activity in Suning area of Raoyang sag, Bohai Bay Basin was analyzed using 3D seismic data and well drilling and logging data, and its control on hydrocarbon migration and accumulation was discussed. The results show that Cenozoic fault activities in Suning area are obviously periodic and can be subdivided into several stages. Paleogene fault activities happened at $E_{1k}-E_{2s}^4$, $E_{2s}^3-E_{2s}^2$ and $E_{2s}^1-E_{3d}$ three periods, the strength of which were from weak to strong generally, and the two most intense fault activities happened at $E_{2s}^3-E_{2s}^2$ and $E_{2s}^1-E_{3d}$ periods in the study area. Since Neogene, the faults in Suning area moved weakly only at the early stage of N_2m . Furthermore, the results show that Cenozoic fault activities in Suning area control hydrocarbon migration and accumulation. It is indicated by the facts that two sets of high-quality hydrocarbon source rocks deposited at the periods of the two most intense Paleogene fault activities and their strong extension effects control the formation of hydrocarbon-rich sags, and the evolution of fault system controls the development and formation of buried-hill traps, and furthermore, affects the evolution of sedimentary facies and distribu-

收稿日期: 2017-01-13。

作者简介: 邓爱居(1965—), 男, 山东潍坊人, 高级工程师, 从事油气勘探及开发地质研究工作。联系电话: 13503276617, E-mail: cy3_daj@petrochina.com.cn。

*通讯作者: 张少华(1990—), 男, 陕西凤翔人, 在读博士研究生。联系电话: 18309219586, E-mail: zhangshh86@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“近海富烃凹陷资源潜力再评价和新区、新领域勘探方向”(2011ZX05023-001)。

tion of sand bodies. As a result, two hydrocarbon reservoiring modes were proposed. In one mode, the hydrocarbon was generated at Cenozoic and migrated laterally along faults and unconformity, and finally accumulated at Paleogene. In the other mode, the hydrocarbon was generated and accumulated both at Cenozoic with multi sources and multi-phase charging.

Key words: fault activity; hydrocarbon accumulation; Cenozoic; Raoyang sag; Bohai Bay Basin

断裂构造是含油气盆地中广泛发育的基本构造类型之一,其分布和活动与油气聚集成藏密切相关^[1-4]。断裂活动不仅控制含油气盆地内生、储、盖、圈闭等成藏要素的发育,还影响油气生排、运聚以及保存等地质作用^[5-7],因此解析沉积盆地内部主要断裂的活动性及其与油气成藏的关系对油气勘探开发具有重要意义。

肃宁地区作为渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷重要的产油区,已经发现宁11、宁古8潜山、宁古1潜山、宁613等多个油藏,且这些油藏常与新生代正断裂相伴生,表明新生代断裂活动与油气成藏关系密切。然而,目前针对肃宁地区构造的研究集中于构造区划^[8]、构造转换带^[9]、潜山演化与油气聚集^[10-11]、构造对沉积的控制^[12]等,但对主要断裂的活动性及其对油气成藏的控制作用缺乏明确认识^[13],在很大程度上制约了研究区油气勘探与开发的深入。为此,笔者利用三维地震数据及钻井、测井资料分析肃宁地区新生代的断裂活动性,并在此基础上探讨断裂活动对油气成藏的控制作用,以期与研究区下一步的油气勘探开发提供依据。

1 地质概况

饶阳凹陷位于渤海湾盆地冀中拗陷的中南部,新生代古近纪的裂陷作用和新近纪以来的热沉降拗陷作用奠定了该凹陷东西分带、南北分区、洼隆相间的构造格局^[14-15]。饶阳凹陷受马西—河间—留路边界断裂的控制,自东向西可分为东部主断裂潜山构造带、东部主洼槽带、中央隆起带、西部次洼槽带和斜坡带;受边界断裂分段活动控制,自北向南发育的马西、河间和饶南3个北北东向洼槽被北部的八里庄—薛庄和南部的留路—大王庄2个变换带分割^[16]。肃宁地区即处于饶阳凹陷中部河间断裂所控制形成的河间洼槽(图1)。

肃宁地区在新生代经历了4个构造—沉积演化阶段^[12,14],分别为孔店组—沙四段沉积时期($E_4k-E_4s^4$)裂陷I幕、沙三段—沙二段沉积时期($E_3s^3-E_3s^2$)裂陷II幕、沙一段—东营组沉积时期($E_3s^1-E_3d$)裂陷III幕以及新近纪以来(N—Q)的拗陷阶段。裂陷I幕表现为断陷、洼槽孤立发育,分隔充

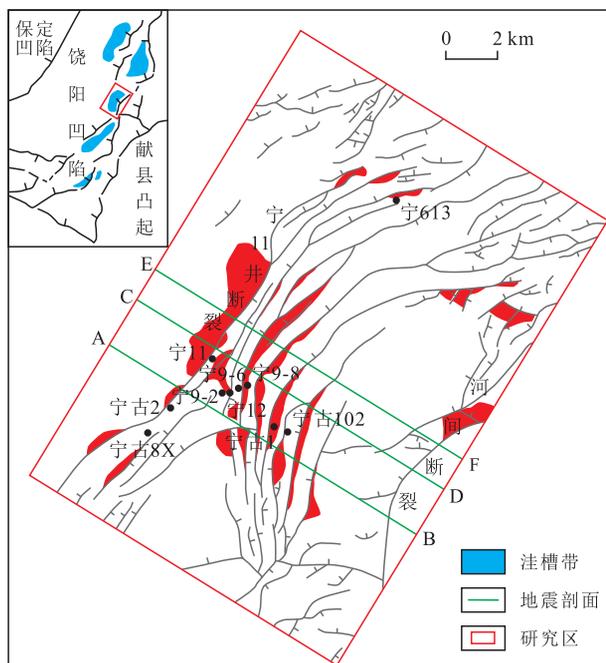


图1 饶阳凹陷肃宁地区构造位置及断裂与油藏分布关系

Fig.1 Location and relationship between faults and hydrocarbon reservoirs distribution in Suning area of Raoyang sag

填;裂陷II幕表现为沙三段沉积时期湖盆扩张深陷、水体连通,沙二段沉积时期湖盆抬升、水体变浅;裂陷III幕表现为湖盆伸展、扩张,其中沙一段沉积时期为研究区新生代最强的一次湖侵,东二段—东一段沉积时期($E_3d^2-E_3d^1$)发生区域构造抬升、湖盆萎缩消亡;新近纪以来,受渤海湾盆地整体热沉降拗陷作用的控制,研究区以稳定沉降为特征,断裂作用微弱乃至停滞。

2 新生代断裂特征

在新生代区域伸展应力场的作用下,肃宁地区发育一系列正断裂,且正断裂活动强度在时空上的差异性控制着研究区的构造格局及演化。

2.1 断裂发育特征

肃宁地区在新生代的构造格架主体为西倾的河间断裂所形成的河间洼槽及其伴生构造。平面上,研究区新生代形成的断裂系统呈弧形分布,但主体走向为北北东向(图1),为凹陷区域构造变换的产物,即受北侧分隔马西洼槽与河间洼槽的八里庄—薛庄变换带和南侧分隔河间洼槽与饶南洼槽

的留路—大王庄变换带的共同控制。纵向上,由地震剖面解释结果(图2)可以看出,北北东走向的河间断裂错断盆地基底,其下降盘的盖层充填呈半地堑形态,上升盘为河间潜山;河间断裂上陡下缓,向深部延伸并消失于一拆离断面上,具有铲式断裂的特征,且断裂中段控制的沉降量较大,向南、北两侧沉降量逐渐减小。河间洼槽中部即为肃宁构造带,该构造带在孔店组—沙四段沉积时期表现为2排受新生代北北东向断裂控制形成的潜山带(图2);潜山地层东老(长城系高于庄组(Chg))西新(蓟县系

雾迷山组(Jxw)),上覆地层的构造样式沿走向发生变化(图2),总体表现为东倾的宁11井断裂上盘发育一系列次级断裂,并形成特征各异的构造样式;其中,在中部表现为梳状断裂组合,向南、北两侧变为包心菜式断裂组合,这种构造样式的变化主要是由区域应变变换传递控制形成的。

2.2 断裂活动特征

断裂活动特征是含油气盆地分析的重要内容,且研究手段较多。含油气盆地内的主要断裂多为长期活动的生长断裂,其上升盘地层多发生剥蚀作用,因此根据生长指数法计算结果分析的断裂活动性普遍存在偏差;而古落差法只能对比同期断裂在不同构造部位的活动性强弱,不能分析在不同地质时期断裂活动性的强弱^[17]。断裂平均活动速率法可以解决上述问题,定量表征断裂在某一地质时期的绝对活动强度。河间断裂和宁11井断裂作为肃宁地区的主干断裂,对构造演化、油气成藏具有至关重要的作用。因此,采用断裂平均活动速率法,选取主干地震测线经时深转换获得深度剖面,在精细解释的基础上确定断裂上升盘和下降盘的地层厚度,计算古落差,并根据古落差与沉积时间的比值计算断裂平均活动速率,进而对研究区新生代的断裂活动特征进行分析。

肃宁地区河间断裂新生代平均活动速率统计结果(图3a)表明,该断裂在新生代不同地质时期的活动强度存在明显差异。在孔店组—沙四段沉积时期,其平均活动速率约为10 m/Ma;沙三段沉积时期,断裂活动性显著增强,平均活动速率超过150 m/Ma;沙二段沉积时期,断裂活动性略有回落,平均活动速率约为100 m/Ma;沙一段沉积时期,断裂活动性再次增强,平均活动速率达250 m/Ma,反映河间断裂进入强烈活动期;东三段沉积时期(E_3d^3),断裂活动性最强,平均活动速率超过350 m/Ma;东二段—东一段沉积时期,断裂活动性明显减弱,平均

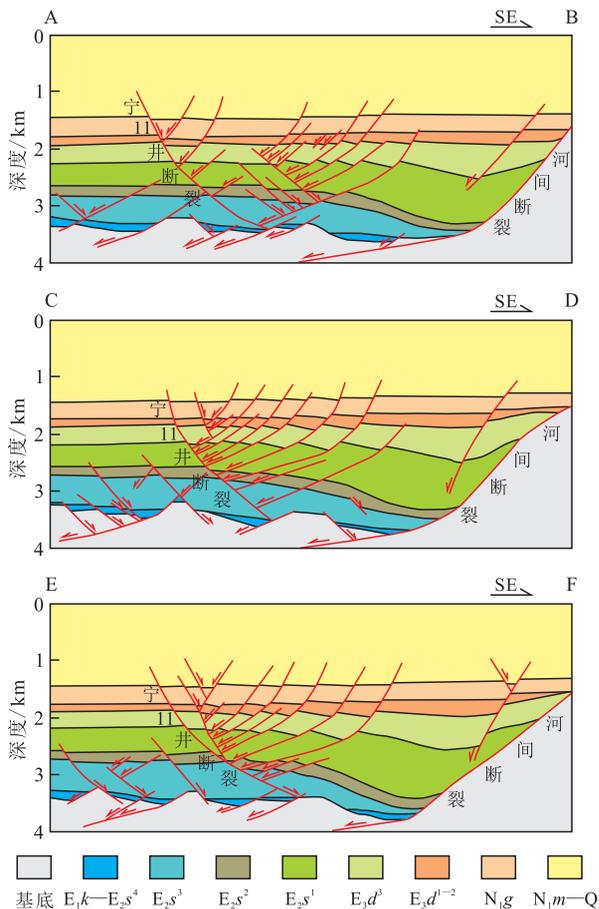


图2 饶阳凹陷肃宁地区地震剖面解释结果
Fig.2 Interpretation results of seismic profiles in Suning area, Raoyang sag

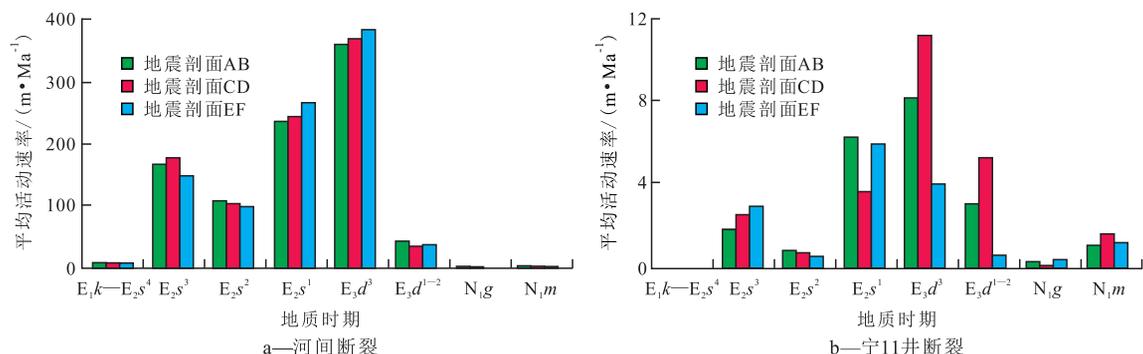


图3 饶阳凹陷肃宁地区主干断裂新生代平均活动速率统计结果

Fig.3 Mean activity rates of the main faults during Cenozoic in Suning area, Raoyang sag

活动速率降至 38.81 m/Ma; 馆陶组沉积时期(N_{1g}), 河间断裂基本停止活动, 平均活动速率仅为 0.65 m/Ma; 明化镇组沉积时期(N_{1m}), 该断裂平均活动速率为 2.55 m/Ma, 断裂活动性较馆陶组沉积时期略有增强。

宁 11 井断裂新生代平均活动速率统计结果(图 3b)表明, 该断裂在孔店组—沙四段沉积时期尚未发育。在沙三段沉积时期, 宁 11 井断裂下降盘地层明显增厚, 表明断裂开始活动, 平均活动速率为 2.5 m/Ma; 沙二段沉积时期, 平均活动速率仅为 0.74 m/Ma, 表明断裂活动性减弱; 沙一段沉积时期, 宁 11 井断裂活动性增强, 平均活动速率为 5.3 m/Ma; 东三段沉积时期, 该断裂活动性继续增强, 平均活动速率约为 7.75 m/Ma; 东二段—东一段沉积时期, 宁 11 井断裂平均活动速率明显回落, 降至 3.03 m/Ma; 馆陶组沉积时期, 该断裂平均活动速率小于 0.3 m/Ma, 表明断裂活动性极弱并趋于静止; 明化镇组沉积时期, 宁 11 井断裂平均活动速率为 1.3 m/Ma, 反映出断裂活动性又略有增强。

综上所述, 可以将肃宁地区古近纪划分为 3 期断裂活动性由弱变强的断裂活动幕, 即孔店组—沙四段沉积时期、沙三段—沙二段沉积时期、沙一段—东营组沉积时期。其中, 沙三段—沙二段沉积时期和沙一段—东营组沉积时期为研究区主要的 2 期断裂活动幕; 自新近纪以来, 研究区主干断裂仅在明化镇组沉积时期发生微弱活动。

3 断裂活动对油气成藏的控制作用

沉积盆地中油气藏的形成受众多地质要素与地质作用的综合影响。在陆相断陷湖盆中, 断裂活动对富烃洼槽发育、储集体形成以及油气运聚等具有控制作用, 进而影响油气成藏^[5-6, 18-27]。

3.1 断裂活动控制富烃洼槽形成

烃源岩研究成果^[28-29]表明, 肃宁地区新生界的主力烃源岩为河间—肃宁洼槽沙三段上亚段和沙一段下亚段泥页岩。沙三段上亚段烃源岩发育于湖侵体系域, 厚度约为 35 m, 总有机碳含量的平均值为 1.18%, 生烃潜量的平均值为 2.19 mg/g, 干酪根类型以 III 型为主。沙一段下亚段烃源岩亦发育于湖侵体系域, 厚度约为 120 m, 总有机碳含量的平均值为 2.61%, 生烃潜量的平均值为 7.00 mg/g, 干酪根类型以 II₁ 型为主。资源评价结果显示, 河间—肃宁洼槽的石油资源量为 1.59×10^8 t, 天然气资源量为 10.74×10^8 m³, 表明河间—肃宁洼槽为饶阳富烃凹

陷内部的一个富烃洼槽, 这与勘探开发实践结果相符^[30]。

河间—肃宁富烃洼槽优质烃源岩的发育时期对应于古近纪强伸展作用时期, 反映出肃宁地区最主要的 2 期断裂活动幕对富烃洼槽的形成具有控制作用。在强伸展作用时期(沙三段上亚段沉积时期和沙一段下亚段沉积时期), 强烈的断裂活动导致研究区快速裂陷、沉降形成欠补偿沉积环境, 发育相当规模的深湖—半深湖区, 形成烃源岩发育与富集的有利区。此外, 古近纪研究区气候温暖、湿润, 湖盆古生产力较高, 在构造、生物、气候协同作用下, 形成发育大量优质烃源岩的富烃洼槽, 成为油气成藏坚实的物质基础。

3.2 断裂演化控制潜山发育及沉积充填

前新生代肃宁地区作为大华北克拉通盆地的一部分, 发育巨厚的沉积盖层, 中生代华北克拉通活化引发的多期构造事件使研究区沉积地层隆升、剥蚀。新生代, 在区域伸展作用下, 渤海湾盆地裂陷、沉降, 前新生界在正断裂改造下沉降至盆底形成潜山, 成为良好的油气储集体^[11]。具体来说, 在孔店组—沙四段沉积时期, 肃宁地区的正断裂初始活动, 发育堡垒相间的伸展构造系统, 形成 2 排与河间断裂近平行的潜山带(图 2)。之后, 河间断裂拆离、滑脱, 发生构造变形, 转变为坡坪式伸展构造系统, 对其上升盘孔店组—沙四段沉积时期形成的潜山改造作用较弱。因此, 肃宁地区的潜山具有早形成、早定型的发育特征^[10], 构成河间—肃宁富烃洼槽中的“凹中凸”, 是油气勘探的有利目标。

此外, 断裂活动控制古地貌与可容空间, 进而影响沉积过程与储集砂体的展布^[31-32]。在孔店组—沙四段沉积时期, 研究区断陷初始发育, 各独立发育的小断陷内部以冲积河流与干盐湖沉积为主。沙三段沉积时期, 河间断裂强烈活动, 独立发育的断陷首次连通并形成主洼槽, 以半深湖—深湖沉积为主, 主洼槽周缘则发育扇三角洲、辫状河三角洲以及滨浅湖沉积。沙二段沉积时期, 研究区的区域断裂活动减弱, 河流和辫状河三角洲沉积广泛发育, 形成大面积连片分布的砂体。沙一段下亚段沉积时期, 区域断裂再次强烈活动, 主洼槽被湖水淹没, 形成研究区第 2 套优质烃源岩。沙一段沉积晚期, 肃宁地区断裂活动减弱, 湖盆开始萎缩, 浅水三角洲向主洼槽快速推进, 形成良好的砂岩储层。东营组沉积时期, 断裂活动继续减弱, 早期沉积的曲流河三角洲砂体是研究区的重要储层; 东营组沉积晚期, 湖盆消失, 发育紫红、棕红色泥岩。新近纪至

今,断裂活动微弱,渤海湾盆地进入热沉降拗陷阶段,研究区以河流沉积为主^[12]。

3.3 断裂活动控制油气运聚成藏

裂陷盆地的断裂活动不仅控制富烃洼槽发育、古地貌演化以及沉积充填,还控制油气运聚成藏过程(图4)。生、排烃研究结果^[33-34]表明,肃宁地区发育沙三段上亚段和沙一段下亚段2套烃源岩,且沙三段上亚段烃源岩于东营组沉积时期开始生烃,现已进入伴生气阶段;沙一段下亚段烃源岩于馆陶组沉积初期进入生低熟油阶段,明化镇组沉积时期开

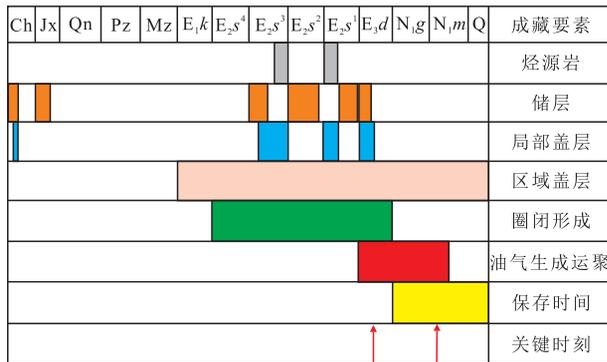


图4 饶阳凹陷肃宁地区油气成藏组合
Fig.4 Chart showing the petroleum system in Suning area, Raoyang sag

始生成熟油并持续至今。综合研究区断裂活动性分析结果可知,肃宁地区大规模生、排烃与圈闭定型之间具有良好的匹配关系,即生、排烃发生于圈闭定型(断裂强烈活动期)之后。因此,前新生界潜山与新生界砂体均可聚集油气,形成新生古储和新生新储型油藏。

肃宁地区潜山油藏的储层主要为长城系和蓟县系白云岩,其遭受多期构造运动及长期风化、剥蚀,孔洞缝发育,储集物性良好。沙三段上亚段烃源岩覆盖其上,在东营组沉积时期,烃源岩开始生烃,油气沿不整合面和(或)断裂向潜山运移并聚集成藏,形成新生古储型断裂—不整合侧向供烃成藏模式(图5a)。新生界油藏在弧形断裂区最为发育(图5b),主要发育层位为沙河街组和东营组,油源主要来自沙三段上亚段和沙一段下亚段烃源岩,具有混源特征。其中沙三段上亚段烃源岩在东营组沉积时期生烃,之后向沙河街组和东营组砂体充注;而沙一段下亚段烃源岩于明化镇组沉积早期生烃,此时研究区断裂活动微弱,因此该套烃源岩生成的油气可沿断裂向上运移,并再次向砂体充注,形成新生新储型多期充注混源成藏模式。

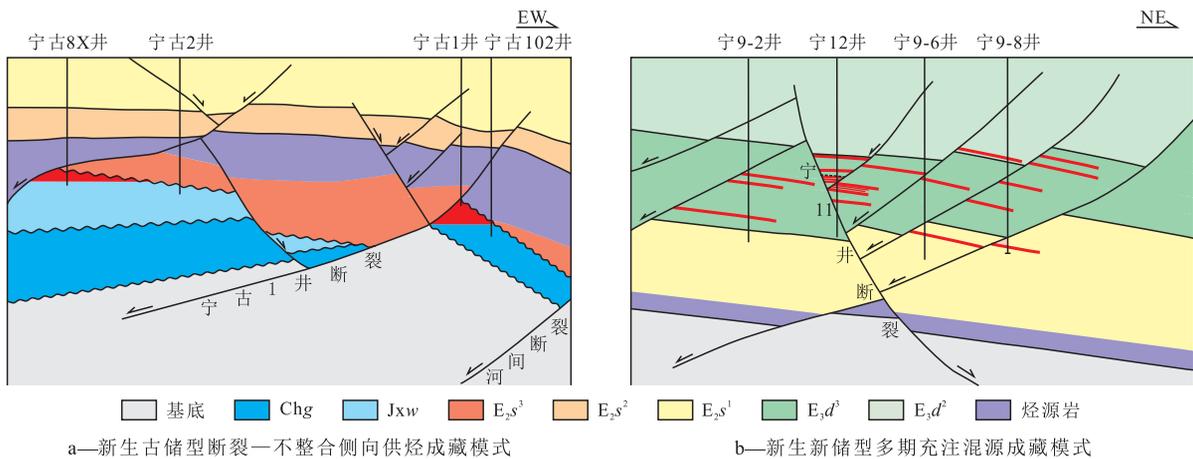


图5 饶阳凹陷肃宁地区油气成藏模式

Fig.5 Hydrocarbon reservoiring modes in Suning area, Raoyang sag

4 结论

肃宁地区新生代断裂活动具有明显的阶段性。古近纪研究区可划分为孔店组—沙四段沉积时期、沙三段—沙二段沉积时期、沙一段—东营组沉积时期共3期断裂活动性由弱变强的断裂活动幕,其中沙三段—沙二段沉积时期与沙一段—东营组沉积时期为研究区主要的2期断裂活动幕;新近纪至今,仅在明化镇组沉积早期发生断裂的微弱活

动。肃宁地区新生代断裂活动对其油气成藏具有控制作用,主要表现为强伸展作用控制富烃洼槽形成,古近纪2期强烈的断裂活动幕控制研究区2套优质烃源岩的发育;断裂演化控制潜山圈闭的发育与定型,且影响沉积体系演化与砂体展布;断裂活动控制油气成藏过程,形成研究区多种油气成藏模式。

参考文献:

[1] Aydin A. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration

- and flow [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(7): 797-814.
- [2] Sorkhabi R, Tsuji Y. Faults, fluid flow, and petroleum traps [M]. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, 2005: 1-31.
- [3] 孙同文, 付广, 吕延防, 等. 断裂输导流体的机制及输导形式探讨 [J]. *地质论评*, 2012, 58(6): 1 081-1 090.
Sun Tongwen, Fu Guang, Lü Yanfang, et al. A discussion on fault conduit fluid mechanism and fault conduit form [J]. *Geological Review*, 2012, 58(6): 1 081-1 090.
- [4] 张少华, 杨明慧, 罗晓华. 断裂带油气幕式运移: 来自物理模拟实验的启示 [J]. *地质论评*, 2015, 61(5): 1 183-1 191.
Zhang Shaohua, Yang Minghui, Luo Xiaohua. Hydrocarbon episodic migration in fault zones: Insights from physical simulation experiments [J]. *Geological Review*, 2015, 61(5): 1 183-1 191.
- [5] Lezzar K E, Tiercelin J J, Turdu C L, et al. Control of normal fault interaction on the distribution of major Neogene sedimentary depocenters, Lake Tanganyika, East African rift [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(6): 1 027-1 060.
- [6] 赵文智, 方杰. 不同类型断陷湖盆岩性-地层油气藏油气富集规律——以冀中坳陷和二连盆地岩性-地层油气藏对比为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 129-134.
Zhao Wenzhi, Fang Jie. Petroleum enrichment rules in lithologic and stratigraphic pools in different faulted basins: An example from the correlation of lithologic and stratigraphic pools in Jizhong Depression and in Erlian Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 129-134.
- [7] 杨明慧. 渤海湾盆地变换构造特征及其成藏意义 [J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 816-823.
Yang Minghui. Transfer structure and its relation to hydrocarbon exploration in Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 816-823.
- [8] 邹娟, 戴俊生, 张丹丹, 等. 构造活动强度划分断陷盆地构造区划——以饶阳凹陷为例 [J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 294-302.
Zou Juan, Dai Junsheng, Zhang Dandan, et al. Structural divisions of rift basin based on the intensity of tectonic activity: a case study from the Raoyang sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 294-302.
- [9] 劳海港, 陈清华, 吴孔友. 饶阳凹陷横向潜山变换带构造特征及其油气聚集规律 [J]. *地质学报*, 2013, 87(3): 415-423.
Lao Haigang, Chen Qinghua, Wu Kongyou. Tectonic characteristics and hydrocarbon accumulation rules of lateral buried hill transformation belt in the Raoyang sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(3): 415-423.
- [10] 吴孔友, 李继岩, 陆诗阔, 等. 冀中饶阳凹陷潜山演化类型及成藏差异性分析 [J]. *海相油气地质*, 2010, 15(1): 27-34.
Wu Kongyou, Li Jiyan, Lu Shikuo, et al. Evolution types and hydrocarbon accumulation differences of buried hills in Raoyang Sag, Jizhong Depression [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(1): 27-34.
- [11] Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, et al. Buried-hill play, Jizhong subbasin, Bohai Bay basin: A review and future prospectivity [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(1): 1-26.
- [12] 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 等. 隐性前积浅水三角洲地震沉积学特征——以渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷肃宁地区为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 566-576.
Zeng Hongliu, Zhao Xianzheng, Zhu Xiaomin, et al. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: A case from the Suning area of Raoyang sag in Jizhong depression, Bohai Bay Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 566-576.
- [13] 卢浩, 蒋有录, 徐昊清. 饶阳凹陷主断层活动期与新近系油气成藏关系 [J]. *断块油气田*, 2011, 18(5): 594-597.
Lu Hao, Jiang Youlu, Xu Haoqing. Relationship between fault activity period and Neogene oil-gas accumulation in Raoyang Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(5): 594-597.
- [14] 杨明慧, 刘池阳, 杨斌谊, 等. 冀中坳陷古近纪的伸展构造 [J]. *地质论评*, 2002, 48(1): 58-67.
Yang Minghui, Liu Chiyang, Yang Binyi, et al. Extensional structures of the Paleogene in the central Hebei basin, China [J]. *Geological Review*, 2002, 48(1): 58-67.
- [15] 孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷中区新生代复合伸展构造 [J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 484-491.
Sun Dongsheng, Liu Chiyang, Yang Minghui, et al. Study on complex extensional structures in the middle Jizhong depression in the Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 484-491.
- [16] 董大伟, 李理, 刘建, 等. 冀中坳陷中北部新生代构造演化特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 771-780.
Dong Dawei, Li Li, Liu Jian, et al. Cenozoic tectonic evolution in the north-central Jizhong Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 771-780.
- [17] 王玺, 陈清华, 朱文斌, 等. 苏北盆地高邮凹陷边界断裂带构造特征及成因 [J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(1): 20-28.
Wang Xi, Chen Qinghua, Zhu Wenbin, et al. Structural characteristics and origin of boundary fault belts of the Gaoyou Sag in the Subei Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(1): 20-28.
- [18] 徐春华, 王亚琳. 基于无机二氧化碳成藏期探讨博兴断层启闭性——兼论断层活动性与启闭性的关系 [J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(5): 30-36.
Xu Chunhua, Wang Yalin. Discussion on the opening and sealing properties of the Boxing Fault based on the accumulation time of inorganic CO₂: Also discussing the relationship between fault activity and sealing property [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 30-36.
- [19] 付广, 陈建华. 断层圈闭油气成藏源-断-势控藏作用综合评价——以海塔盆地中部主要断陷带南一段为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(6): 1-6.
Fu Guang, Chen Jianhua. Comprehensive evaluation for control of source rock, fault and potential on faults-enclosed oil/gas accumulation: A case study of K_m of main central depression zones in Haita basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6): 1-6.
- [20] 蒋有录, 刘培, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4):

- 525-533.
- Jiang Youlu, Liu Pei, Song Guoqi, et al. Late Cenozoic Faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 525-533.
- [21] 姜治群, 吴智平, 李伟, 等. 断裂对黄河口凹陷新近系油气分布的控制作用 [J]. *特种油气藏*, 2016, 23(6): 50-54.
- Jiang Zhiquan, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Effect of faults on Neogene hydrocarbon distribution in the Yellow River Estuary Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(6): 50-54.
- [22] 李萌, 汤良杰, 李宗杰, 等. 走滑断裂特征对油气勘探方向的选择: 以塔中北坡顺1井区为例 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 113-121.
- Li Meng, Tang Liangjie, Li Zongjie, et al. Fault characteristics and their petroleum geology significance: A case study of well Shun-1 on the northern slope of the central Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 113-121.
- [23] 刘畅, 陈冬霞, 董月霞, 等. 断层对南堡凹陷潜山油气藏的控制作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 43-50.
- Liu Chang, Chen Dongxia, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon accumulation of buried hill reservoirs in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 43-50.
- [24] 柳永军, 徐长贵, 吴奎, 等. 辽东湾拗陷走滑断裂差异性对大中型油气藏的形成 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(5): 555-560.
- Liu Yongjun, Xu Changgui, Wu Kui, et al. Different characteristics of strike-slip faults and the formation of large and medium-scaled oil and gas fields in the Liaodong Bay Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(5): 555-560.
- [25] 潘国强. 塔南凹陷断层分段生长与“源-储”的耦合关系 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2015, 34(6): 20-26.
- Pan Guoqiang. Coupling relationships between the fault segmentation growth and “source-reservoir” for Tanan Sag [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(6): 20-26.
- [26] 王玉秀, 官大勇, 张宏国, 等. 郯庐走滑断裂带消减端断裂特征与油气成藏 [J]. *特种油气藏*, 2015, 22(2): 56-58.
- Wang Yuxiu, Guan Dayong, Zhang Hongguo, et al. Fracturing features and oil/gas reservoir forming at the pinchout end of Tanlu strike-slip faulting belt [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(2): 56-58.
- [27] 张秀云. 不同运移方向下断一砂配置聚集油气的差异性 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2016, 35(2): 14-19.
- Zhang Xiuyun. Differences in the oil-gas accumulation by the fault and sandbody match in different migration directions [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(2): 14-19.
- [28] 王建, 马顺平, 罗强, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷烃源岩再认识与资源潜力分析 [J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 51-55.
- Wang Jian, Ma Shunping, Luo Qiang, et al. Recognition and resource potential of source rocks in Raoyang Sag of Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 51-55.
- [29] 金涛, 高日胜, 高彩霞, 等. 从烃源岩测井评价结果看冀中拗陷饶阳凹陷勘探前景 [J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(3): 406-412.
- Jin Tao, Gao Risheng, Gao Caixia, et al. Suggestion of exploration prospect in Raoyang sag of Jizhong depression from the logging evaluation results of source rock [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 406-412.
- [30] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地富油凹陷二次勘探工程及其意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 723-733.
- Zhao Xianzheng, Wang Quan, Jin Fengming, et al. Re-exploration program for petroleum-rich sags and its significance in Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 723-733.
- [31] McLeod A E, Underhill J R, Davies S J, et al. The influence of fault array evolution on synrift sedimentation patterns: Controls on deposition in the Strathspey-Brent-Statfjord half graben, northern North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(6): 1 061-1 093.
- [32] 章惠, 孙思敏, 季汉成, 等. 南堡凹陷边界断层分段特征及其对沉积体系的控制作用 [J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(3): 20-25.
- Zhang Hui, Sun Simin, Ji Hancheng, et al. Segmentation characteristic of boundary fault in Nanpu sag and its control on sedimentary system [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(3): 20-25.
- [33] 赵利杰, 蒋有录, 刘华, 等. 饶阳凹陷烃源岩热演化特征及其与油藏分布的关系 [J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(4): 1-4.
- Zhao Lijie, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Thermal evolution of Paleogene source rocks and relationship with reservoir distribution in Raoyang sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(4): 1-4.
- [34] 王浩, 王飞宇, 周仁志, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙三段烃源灶精细评价 [J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(4): 423-429.
- Wang Hao, Wang Feiyu, Zhou Renzhi, et al. Fine evaluation of Es₃ source kitchen in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(4): 423-429.

编辑 邹淑滢