

渤海海域北部秦南凹陷东南缘古近系断层活动及其对沉积的控制

庞小军¹,王清斌¹,代黎明¹,李欢¹,陈晶²

[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院,天津 300459; 2. 中国石化上海海洋油气分公司,上海 200120]

摘要:利用钻/测井、三维地震等资料,在断层活动速率统计的基础上,分析了渤海海域北部秦南凹陷东南缘古近系边界断层活动演化特征,并探讨了边界断层活动对沉积的控制作用。研究表明:研究区边界断层具有明显的分段性,且由石北1西、石北1东、石北2西、石北2东等4段组成。纵向上,孔店组至沙四段沉积期,边界断层开始活动,且活动性较弱;沙三段沉积期,断层活动增强;沙一+二段沉积期,断层活动性减弱;东三段沉积期,断层活动再次增强,东二段沉积期,断层活动逐渐减弱,至东一段沉积期,断层停止活动。平面上,同一地质时期不同段的边界断层均表现为中部强、两端弱的特点。空间上,同一位置的断层活动性具有继承性。边界断层活动的差异性控制了盆地的差异升降,导致物源区的差异剥蚀,并形成了不同的沉积格局和构造转换带,进而对物源区的剥蚀以及沉积区的沉降速率、沉积相类型、沉积相分布、三角洲的延伸距离、岩性具有重要的控制作用。

关键词:断层活动;沉积;物源;剥蚀;古近系;秦南凹陷;渤海海域

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Paleogene fault activities and their control over sedimentation at southeastern margin of Qinnan Sag, northern Bohai Sea

Pang Xiaojun¹, Wang Qingbin¹, Dai Liming¹, Li Huan¹, Chen Jing²

(1. Bohai Petroleum Research Institute, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300459, China;

2. SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Drilling/logging, 3D seismic data and other information were combined with fault activity rate statistics to analyze quantitatively the characteristics of the Paleogene boundary fault activities and their control over sedimentation in southeastern margin of Qinnan Sag, Bohai sea. The result shows the boundary faults in the study area were significantly segmented into four sections: west Shibeil, east Shibeil, west Shibeil2 and east Shibeil2. Vertically, the faulting initiated during the deposition of Ek to Es⁴, and then went through two cycles of enhanced and subdued stages during the deposition of Es³, Es¹⁺², Ed³, and Ed², and finally inactivated during the deposition of Ed¹. Laterally, the boundary faulting was characterized by being intensive in the central part but weak at both ends during the same geological period. From a space angle, faulting activities were successively carrying on at the same location. The differences of boundary faulting controlled the differential rise and fall of basins, resulting in differential erosion in provenances and the formation of various deposition patterns and tectonic transfer zones, which further affected erosion rate of the provenances, subsidence rate, types and distribution of sedimentary facies, delta extension distance, as well as lithologies in depositional basins.

Key words: fault activity, deposition, provenance, erosion, Paleogene, Qinnan Sag, Bohai Sea

近年来,陆相断陷盆地的研究越来越重视构造活动与沉积之间的关系。颜世勇等^[1]总结了渤海湾盆地惠民凹陷断层活动特征与区域构造演化的关系。姜华

等^[2]通过对珠江口盆地珠三坳陷神狐组-恩平组沉积时期南断裂活动性的定量分析,总结了断层活动性对古地貌形态、沉降中心变化、砂分散体系规模以及厚度

等的控制作用。史冠中等^[3]通过南堡凹陷柏各庄断层活动特征的分析,认为断层活动的差异性对沉降中心的发育和转移、砂分散体系类型、规模和分布的具有明显控制作用。王华等、蔡佳等、刘琴琴等^[4-6]通过对南阳凹陷、南堡凹陷、福山凹陷断层活动性与沉积特征的研究,认为断层活动不仅与区域构造活动具有一致性,同时控制了沉降中心和沉积体系的展布。因此,陆相断陷盆地的断层活动与古地貌变化、沉积格局、沉降中心的分布和演化、砂分散体系的类型、规模和分布均具有明显的响应关系。近年来,秦南凹陷东南缘陡坡带秦皇岛 29-2 地区发现了亿吨级大型油气田,油气主要分布在古近系,而该区的研究主要集中在层序地层格架、沉积相类型及分布、烃源岩特征、油气成藏等宏观方面^[7-12],对断层与沉积之间的关系研究比较少。本文充分利用钻井、三维地震资料,运用断层活动速率法,定量探讨了秦南凹陷东南缘古近系石北断层分段活动性及其对沉积的控制作用,对类似陡坡带的储层预测提供借鉴。

1 地质背景

秦南凹陷位于渤海海域的北部,北与昌黎凹陷以秦南凸起相隔,南与渤中凹陷以石臼坨凸起隔,西与南堡凹陷以柏各庄凸起相隔,东与辽西凸起、辽中凹陷相接,面积大约 2 300 km² (图 1)。在 2009 年之前,该区钻探数口探井,但均无重大油气发现^[9-11];而在石臼坨凸起的南部陡坡带古近系,均发现了大量的油气^[13-15]。2009 年之后,相继钻探了 QHD29-2 构造和 QHD29-

2E 构造,并发现了亿吨级大型油气田,揭示了该区较大的油气勘探潜力。钻井揭示,凹陷发育完整的古近系孔店组、沙河街组(沙四段、沙三段、沙二段、沙一段)、东营组(东三段、东二段、东一段)、新近系和第四系。该区主要发育 2 套烃源岩,分别为沙三段和沙一段;已发现的油气藏主要分布在沙一+二段储层中;生烃史模拟揭示^[11],凹陷西洼的烃源岩未进入成熟阶段,而油气主要来源于东洼的烃源岩。研究区位于秦南凹陷东南缘的陡坡带,该区边界断层发育(图 1)。

2 断层活动特征

2.1 断层基本特征

秦南凹陷东南缘古近系边界断层发育,且由石北 1 号断层和石北 2 号断层组成(图 1),走向呈近东西向-北东向或近东西向,倾向为向北或向北西。其中石北 1 号断层分为石北 1 西和石北 1 东等 2 段,石北 2 号断层分为石北 2 西和石北 2 东等 2 段。石北 1 西段比石北 1 东段稍短,石北 1 西段断层西部向石臼坨凸起延伸,东部伸入秦南凹陷,石北 1 东断层西部与石北 1 西断层相接,东部延伸至秦南凹陷;石北 2 西断层比石北 2 东断层延伸距离长,石北 2 西断层西部向石臼坨凸起延伸,并与石北 1 东断层东部平行,该位置具有转换带的特点,东部向秦南凹陷延伸,石北 2 东断层长度短,东部与石北 2 西相接,西部伸入秦南凹陷。该区古近系次生断层不甚发育。

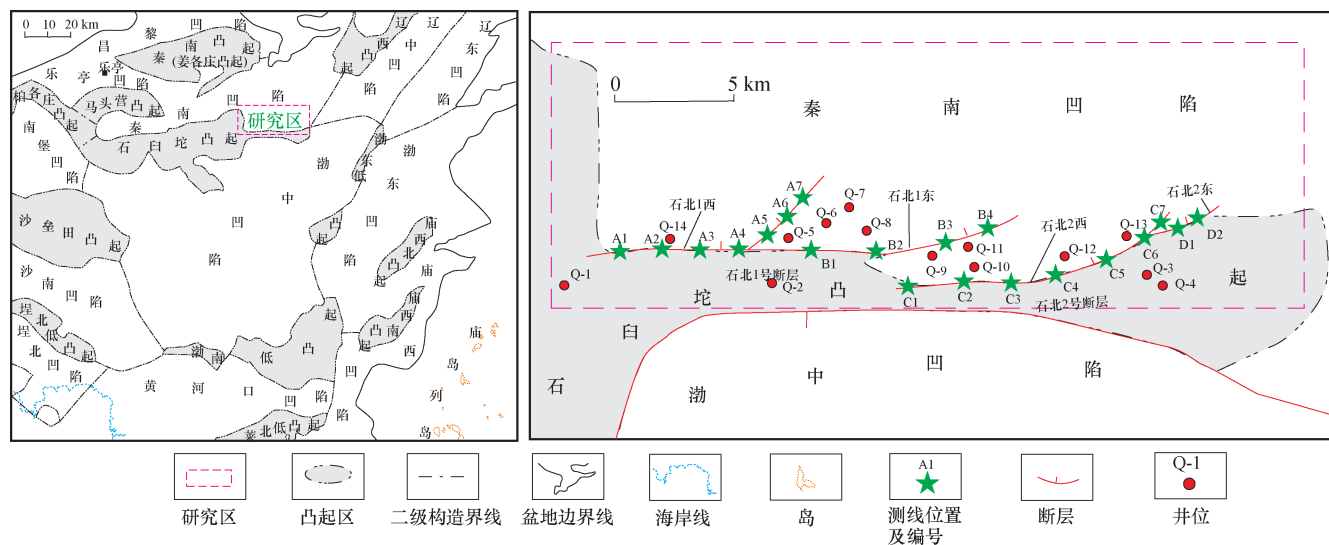


图 1 秦南凹陷东南缘研究区位置、断层展布、统计点位置和编号

Fig. 1 Diagram showing the location and fault distribution (numbers and positions of statistic points) of southeastern margin of Qinnan Sag

2.2 断层活动特征

目前,断层活动的研究方法主要有断层落差法、生长指数法和活动速率法^[1-6],由于断层活动速率法同时考虑了断层活动形成的落差和沉积时间,因此能够较为准确地反映断层的活动性。本文以秦南凹陷东南缘古近系边界断层为研究对象,选取了过断层的20条典型地震测线(图1),对石北1号断层、石北2号断层不同段不同层位的断层落差进行了详细的统计,并根据各落差对应的沉积时间跨度计算了不同测线处不同层位的断层活动速率,绘制了边界断层不同段的平均活动速率演化图(图2)以及活动速率的空间演化图(图3),并分析了边界断层不同段的活动特征。

图2揭示,同一断层,不同时期的边界断层活动强度不同。研究区石北1西、石北1东、石北2西断层在古近系的活动性表现为“弱-强-弱-强-弱-最弱”的特点,即孔店组-沙四段为盆地的初始裂陷期,断层开始活动;沙三段为盆地的强裂陷期,断层活动增

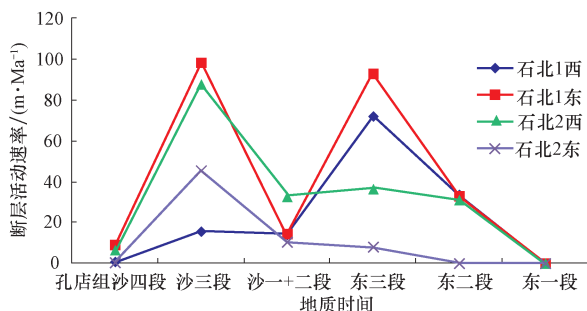


图2 秦南凹陷东南缘边界断层各段活动速率空间演化曲线

Fig. 2 Evolution curves showing activity rates of each section of the boundary faults, southeastern margin of Qinnan Sag

强;沙一+二段为弱断陷期,断层活动减弱;东营组为盆地的断拗转换期,东三段断层活动再次最强,东二段减弱,至东一段,断层停止活动。而石北2西、石北2东断层活动在沙三段最强,而沙一+二段和东三段活动速率相差不大,活动速率均较大。

同一时期,不同断层的活动强度也具有差异性。孔店组-沙四段、沙三段沉积时期,边界断层各段的活动强度表现为“石北1东>石北2西>石北2东>石北1西”;沙一+二段沉积期,断层各段的活动强度表现为“石北2西>石北1东>石北1西>石北2东”;东三段和东二段沉积期,断层各段的活动强度表现为“石北1东>石北1西>石北2西>石北2东”;至东一段沉积期,断层停止活动。

图3揭示,不同时期,各边界断层的活动强度均表现为“弱-强-弱”的特点,且在同一断层活动强度的峰值处具有继承性发育特点。古近系沉积时期,石北1西断层在A4处断层活动强度最大,孔店组-沙四段、沙三段、沙一+二段、东三段、东二段各时期最大断层活动速率分别为3.7,67.2,25.5,244.0及99.7 m/Ma;石北1东断层在B3处活动强度最大,各时期的最大断层活动速率分别为12.7,123.3,23.5,140.0及52.8 m/Ma;石北2西断层在C4处活动强度最大,各时期的最大断层活动速率分别为11.8,131.8,57.8,90.0及93.8 m/Ma;石北2东断层在D2处活动强度最大。在断层的两端或在断层的相接处断层活动较弱。

总之,研究区边界断层具有明显的分段性,各段的断层活动具有明显的差异性,同一条断层不同位置的活动强度不同,同一时期不同段、不同位置的活动强度也不相同。这种断层在平面上和纵向上的差异性导致了构造转换带的变化以及物源剥蚀强度、沉降中心的

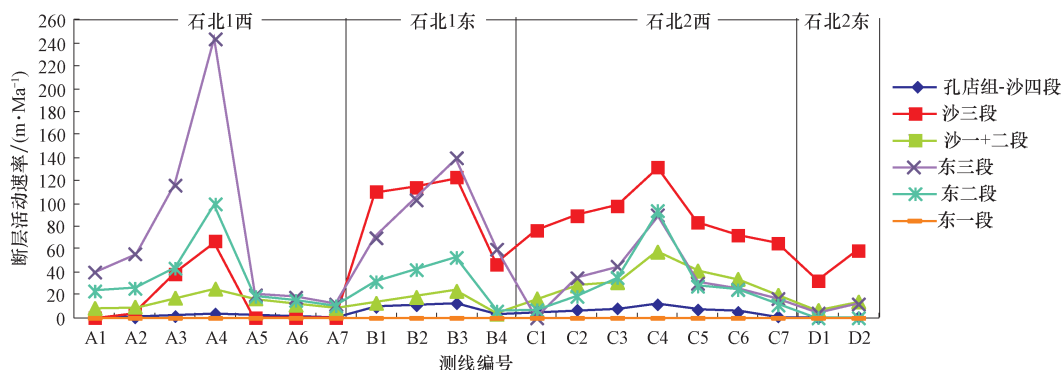


图3 秦南凹陷东南缘不同位置不同层位边界断层活动速率空间演化曲线

Fig. 3 Evolution curves showing activity rates of boundary faults in different horizons at different locations, southeastern margin of Qinnan Sag

不同,进而对砂分散体系的展布、类型以及砂砾岩百分含量、厚度具有重要的影响。

3 断层活动对构造转换带的控制

研究区石北1号断层与石北2号断层之间存在一个构造转换带(图1),该构造转换带形成于古近系孔店组-沙四段时期,该时期石北1东(B2至B4位置处)断层活动性比石北2西(C1至C3处)断层大(图3),两断层交汇处的平均断层活动速率分别为 9.1 m/Ma 和 8.3 m/Ma ,两者相差 0.8 m/Ma 。沙三段时期,构造转换带两侧断层活动继承了孔店组-沙四段的发育特征,石北1东与石北2西断层交汇处的平均断层活动速率分别为 94.8 m/Ma 和 87.8 m/Ma ,前者比后者的断层活动速率大,两者相差 7 m/Ma 。沙一+二段时期,构造转换带两侧断层平均活动速率 15 m/Ma 和 25.5 m/Ma ,石北1东断层活动性小于石北2西断层,且两者相差 10.5 m/Ma 。东三段沉积期,构造转换带两侧断层平均活动速率变为 101.1 m/Ma 和 26.7 m/Ma ,石北1东断层活动性大于石北2西断层,两者相差 73.4 m/Ma 。东二段时期,两侧断层平均活动速率变为 33.6 m/Ma 和 20.3 m/Ma ,石北1东断层活动性大于石北2西断层,两者相差 13.3 m/Ma 。东一段时期,断层停止活动。

因此,沙一+二段沉积时期构造转换带两侧表现为石北1东断层活动性比石北2西弱,造成构造转换带地层向石北2西断层倾,形成断槽,更有利于辫状河三角洲砂体的搬运和堆积;而其他时期,石北1东断层活动性比石北2号强,导致构造转换带地层向石北1东断层倾,形成断坡,易发育向石北2号断层超覆的泥岩沉积,不利于砂体的搬运和堆积。总之,不同时期石

北1东与石北2西断层活动的差异性控制了构造转换带的演化以及它在沉积过程中的不同角色。

4 断层活动对物源剥蚀强度的控制

研究区边界断层为控盆断层,它的差异活动直接控制了剥蚀区与沉积区的差异升降作用,进而控制着物源区不同位置的剥蚀强度。以整个古近系为例,利用钻井和三维地震资料,对石北1西、石北1东和石北2西、石北2东断层不同位置的断层活动速率进行了统计,并绘制了古近系断层活动速率曲线图(图4)。统计发现,石北2西断层C4处古近系断层活动速率最大,为 40.8 m/Ma ,剥蚀厚度约 1800 m 左右,造成该位置附近物源区中生界剥蚀殆尽,出露二叠系砂泥岩互层,剥蚀强度较大;而石北1西和石北1东断层的A4和B2处古近系断层活动速率出现峰值,分别为 30.9 m/Ma 和 29.4 m/Ma ,剥蚀厚度约为 980 m 左右,该位置附近的物源区残留厚度较大的中生界火山岩,与石北2西断层C4处相比,剥蚀强度小。总之,古近系沉积时期,由于西部断层活动强度小于东部,导致东部物源区(如D3和D4井区)抬升速率大于西部物源区(如D2井区),因而东部物源区的剥蚀强度大于西部物源区,最终使得东部物源区剥蚀厚度大于西部。而在古近纪的各沉积时期,边界断层的活动强度与物源区的抬升、剥蚀也具有同样的特点,这里不再做赘述。

5 断层活动对沉积的控制

秦南凹陷东南缘古近系石北1西、石北1东、石北1西和石北1东断层的活动性及其相互配置关系形成的古地貌对砂分散体系和砂体展布具有明显的控制作用^[2-6]。

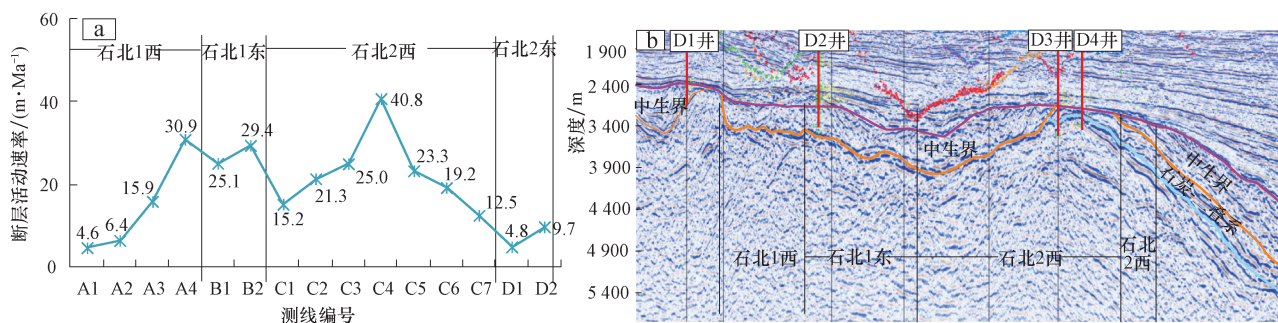


图4 秦南凹陷东南缘古近系断层活动强度与物源区剥蚀强度对比

Fig. 4 Intensity comparison of fault activity and provenance erosion during the Paleogene in southeastern margin of Qinnan Sag

a. 古近系断层活动速率曲线;b. 物源区残留地层地震反射特征

5.1 断层活动对沉降速率的控制

5.1.1 平面控制规律

研究区古近系各沉积时期边界断层的差异活动导致沉降中心的形成及其分布的差异性(图5)。

沙三段沉积期,边界断层活动较强,且在边界断层中部活动强,两侧弱,进而在研究区形成了统一的沉降中心,最大沉降速率约为 320 m/Ma。石北1西和石北2东断层活动较弱,石北2东和石北2西断层活动较强,沉降速率较大,在地震测线 B3 和 C4 处断层活动速率最大,分别为 123.3 m/Ma、131.8 m/Ma,沉降中心靠近这两个位置,且沉降中心的范围较大。沉降中心的长轴轴方向与边界断层的走向一致,因此,边界断层对沉降中心具有明显的控制作用。

沙一+二段沉积期,边界断层活动减弱,沿边界断层发育3个沉降中心。该时期断层活动速率变化较快,在边界断层活动较强的 A4, B3, C4 处分别发育范围较小的沉降中心,断层活动速率分别为 25.5, 23.5, 57.8 m/Ma,最大沉降速率分别为 103, 87 和 123 m/Ma,沉降中心的范围在 A4 处和 C4 处较大, B3 处较小。

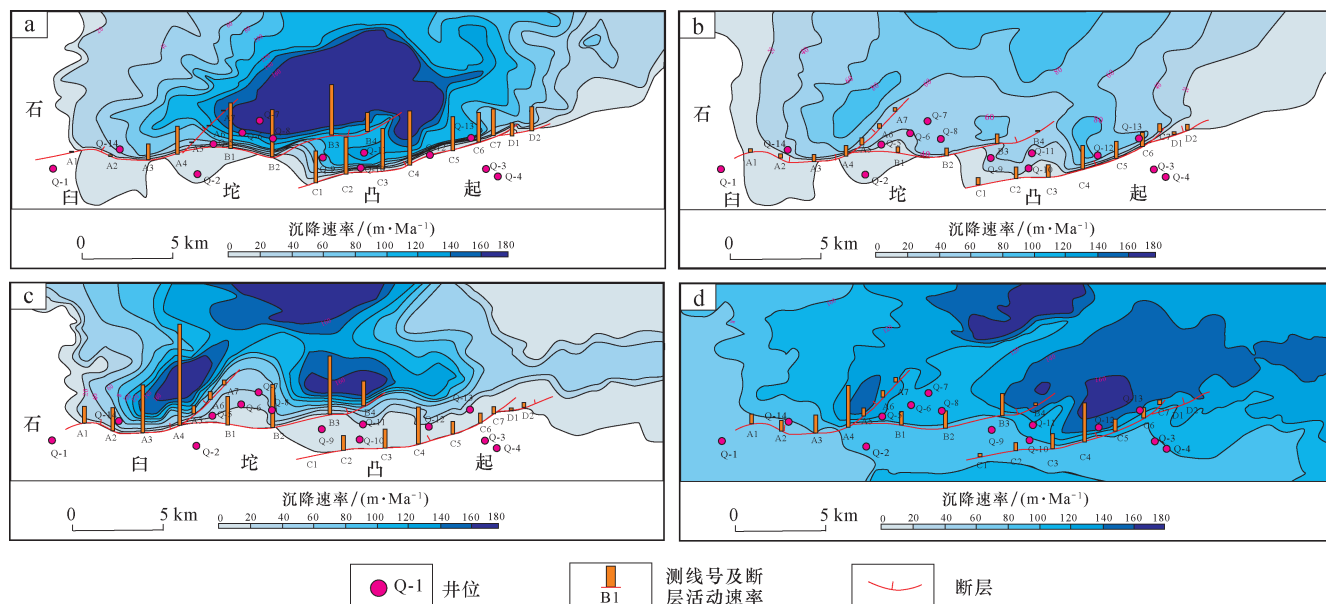
东三段沉积期,边界断层活动再次增强,且石北1西和石北1东断层活动明显大于石北2西和石北2东断层,沿边界断层发育2个沉降中心,具有明显的继承性,分别位于石北1西和石北1东断层的 A4 和 B3 处,

断层活动速率分别为 244、140 m/Ma,对应沉降中心的最大沉降速率为 320 和 280 m/Ma,沉降中心范围相差不大。而石北2西和石北2东断层活动较弱,沉降中心远离该边界断层,且对沉降中心的控制作用较弱。

至东二段沉积期,边界断层活动再次减弱,该时期的早期,断层活动控制着沉降中心的发育,且沿断层走向在石北1西和石北2西断层的 A4 和 C4 处发育沉降中心, A4 处断层活动速率为 99.7 m/Ma,对应沉降中心的最大沉降速率约为 210 m/Ma,沉降中心范围小;而 C4 处断层活动速率为 93.8 m/Ma,对应沉降中心的最大沉降速率约为 230 m/Ma,沉降中心范围大。至东二段沉积期晚期,断层停止活动,东营组沉积物覆盖凸起。

5.1.2 纵向演化规律

纵向上,不同时期不同位置的断层活动性既具有相似性,又具有差异性。石北1西、石北1东、石北2西和石北2东断层的 A4, B3, C4 和 D2 位置断层活动性始终最强,因此,在 A4, B3, C4 处的沉降速率均较大,在这3个位置容易形成沉降中心。石北1西、石北1东和石北2西断层均表现为“弱-强-弱”的活动特征,在纵向上具有继承性演化的特点,沉降中心往往靠近断层活动强的位置,且在纵向上继承性发育。但是,不同时期的断层活动强度不同,导致沉降速率大小具有差异性,沙三段断层活动强,沉降速率大;沙一+二段断层活动减弱,沉降速率减小;东三段断层活动强度



增大,沉降速率也相应地增大;东二段断层活动减弱,至东二段后期断层停止活动,对应的沉降速率减小。沙三段和东三段沉积期,石北 1 西和石北 1 东断层活动强,沉降中心主要沿石北 1 西断层或石北 1 东断层分布;而沙一+二段和东二段沉积期,石北 2 西断层活动大于石北 1 西和石北 1 东断层,沉降中心主要沿石北 2 西断层分布。

5.2 断层活动对沉积体系的控制

断层活动对沉积相类型、展布及其岩性具有明显的控制作用^[2-6],下面对秦南凹陷东南陡坡带古近系的断层活动与沉积体系的关系进行详细阐述。

5.2.1 沉积相类型及其展布

利用钻/测井、岩芯、三维地震反射及属性分析(图 6),在前人研究的基础上^[7],确定了秦南凹陷东南缘古近系的沉积相类型和展布(图 7)。

以沙一+二段沉积相为例进行沉积相类型及展布的确定(图 6,图 7b)。沙一+二段沉积期,主要发育扇三角洲和湖泊沉积,录井上,主要以厚层砂砾岩夹灰色薄层泥岩为主,砾石较粗,分选、磨圆差,粒径约 0.3~15 cm 不等;测井上,单个砂层发育扇三角洲前缘亚相

河口坝微相的漏斗状特征,以及水下分河道微相中的齿化箱型特征;地震上,由物源区向湖盆方向表现为弱振幅前积反射逐渐向强振幅低频较连续亚平行反射过渡的特征,代表扇三角洲向湖相沉积逐渐转变;均方根振幅属性上,由于扇三角洲与湖相过渡的位置波阻抗最强,因此,出现环带现象,环带的外边界代表扇三角洲与湖相之间的界限。

通过上述方法,确定了研究区沙三段、沙一+二段、东三段和东二段各沉积期的沉积相类型及展布(图 7),并分析了各沉积时期沉积相的类型和展布特征。研究表明,秦南凹陷古近系主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊等几种沉积相类型。

沙三段沉积期,主要发育扇三角洲和湖泊沉积,扇三角洲环绕石臼坨凸起分布,分布范围较小,向湖泊延伸距离短,而湖泊相分布广泛。在研究区西部扇三角洲较发育,东部仅在石北 2 西断层的东部发育(图 7a)。

沙一+二段沉积期,主要发育辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊沉积,辫状河三角洲和扇三角洲环绕石臼坨凸起继承性发育,分布范围明显扩大,湖泊范围减小。在研究区西部以及石北 1 西、石北 1 东、石北 2 西、石北 2 东断层的下降盘,辫状河三角洲和扇三角洲均发育(图 7b)。

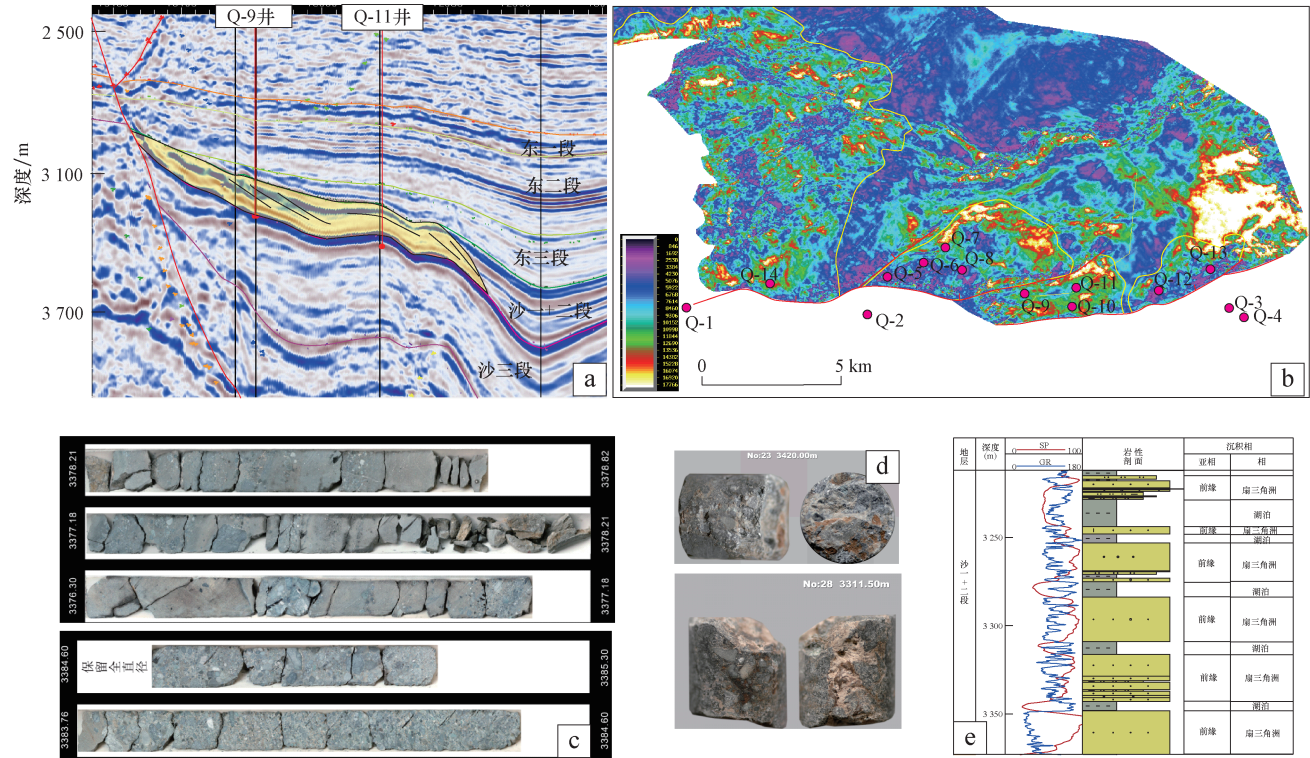


图 6 秦南凹陷东南缘沙一+二段沉积相类型及平面展布的确定

Fig. 6 Sedimentary facies and their plane distribution in Es¹⁺², southeastern margin of Qinnan Sag

a. 地震相近特征;b. 均方根振幅属性(黄色边界代表扇三角洲边界);c. Q-13 井岩心特征(砂砾岩);
d. Q-16 井壁心特征(砂砾岩);e. Q-19 井录井/测井特征

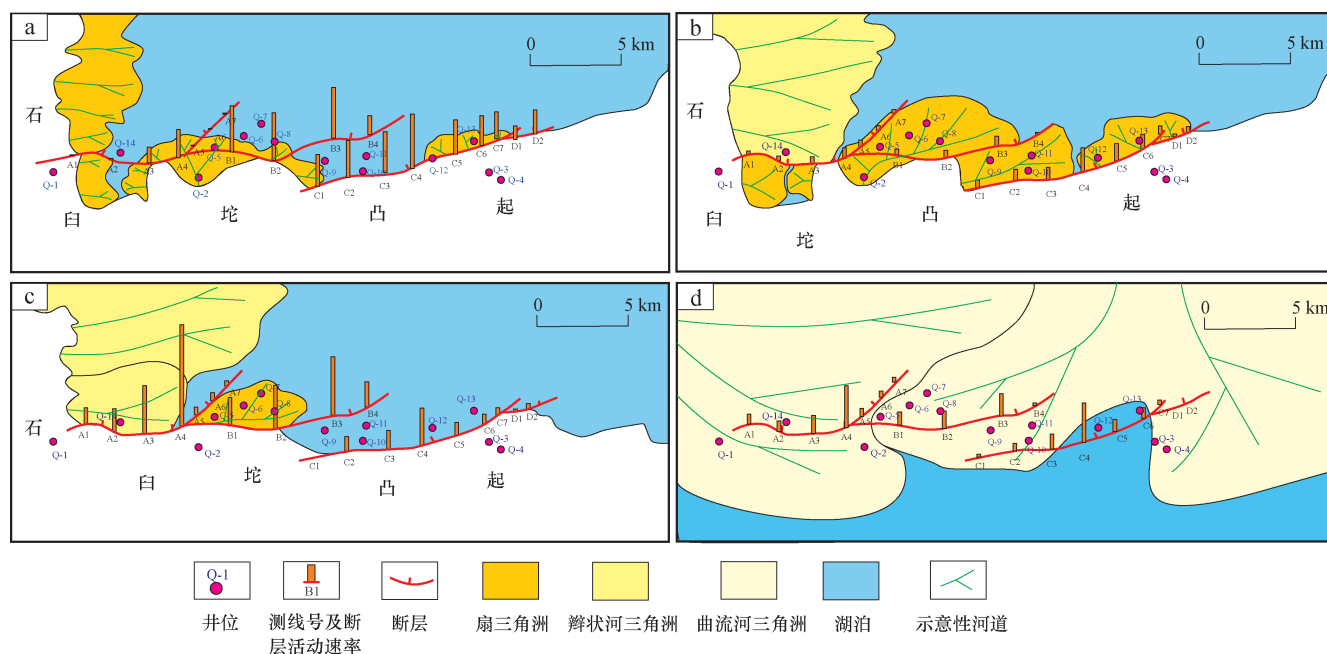


图7 秦南凹陷东南缘古近系各时期断层活动速率与沉积相叠合图

Fig. 7 Overlay chart showing fault activity rate and sedimentary facies in the Paleogene, southeastern margin of Qinnan Sag

a. 沙三段; b. 沙一 + 二段; c. 东三段; d. 东二段

东三段沉积期,主要发育辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊沉积,但辫状河三角洲和扇三角洲范围明显减小,湖泊范围明显扩大。辫状河三角洲和扇三角洲仅在研究区西部和石北1西、石北1东断层下降盘发育(图7c)。

至东二段沉积期,主要发育曲流河三角洲和湖泊沉积,石臼坨凸起被东二段沉积物覆盖,凸起不再提供物源,秦南凹陷以及石臼坨凸起被曲流河三角洲充填和覆盖(图7d)。

5.2.2 断层活动对沉积相类型及展布的控制

断层不同位置的差异活动主要对研究区古近系的沉积相类型和展布具有明显控制作用(图7)。

沙三段沉积期,断层活动强烈,平均断层活动速率为60.6 m/Ma,最大断层活动速率为131.8 m/Ma,处于盆地的强断陷期,盆地快速沉降,扇三角洲沉积发育,范围较小。该时期秦南凹陷处于区域性的湖盆扩张期,湖水范围分布广,石北1西断层的中部、石北1西断层的西部以及石北2西断层的西部断层活动性较强,因此,形成统一的沉降中心,湖泊沉积广泛发育。受强断层活动的影响,在靠近沉降中心的凸起周围发育一系列延伸距离较短、分布范围小的扇三角洲沉积,如图7a中的A4-B2和C5-C7等位置。

沙一 + 二段沉积期,断层活动明显减弱,平均断层活动速率为20.3 m/Ma,最大断层活动速率为57.8 m/Ma,

处于盆地的弱断陷期,扇三角洲和辫状河三角洲发育,范围明显扩大。断层对沉积相的控制依然很明显。受断层活动差异的影响,在研究区形成3个靠近断层的沉降中心,因此,在石北1西断层西部,断层活动弱,沉降中心距离物源区较远,主要发育辫状河三角洲,而在断层活动较强的石北1东、石北2西和石北2东断层的位置,沉降中心离物源较近,扇三角洲沉积发育,如图7b中B1-B3, C1-C3及C4-D2等位置。

东三段沉积期,断层活动再次增强,平均断层活动速率为56.9 m/Ma,最大断层活动速率为244 m/Ma,处于盆地的强断陷期,扇三角洲和辫状河三角洲发育,范围明显缩小,数量也减小。断层对沉积的控制作用很明显,在断层活动较强的A4和B3位置附近形成了2个靠近断层的沉降中心,在石北1西和石北1东断层的西部发育辫状河三角洲和扇三角洲沉积,石北2西和石北2东断层附近以湖相沉积为主。

至东二段沉积期,断层活动减弱,平均断层活动速率为29.4 m/Ma,最大断层活动速率为99.7 m/Ma,处于盆地的断-拗转换期,发育来自西北部 and 北部2个方向的曲流河三角洲发育,石臼坨凸起不再提供物源。该沉积期的早期,断层依然活动,而湖盆快速扩大,至改成及其的中晚期,盆地整体沉降,断层停止活动,导致湖水漫过石臼坨凸起,至此,石臼坨凸起处于水下而成为接受沉积的位置。

整体上,断层的差异活动控制了古地貌、沉降中心以及碎屑沉积物运移的方向,进而控制了沉积相的类型和展布。沙三段至东三段,在断层活动强的位置扇三角洲发育,而在断层活动弱的西部辫状河三角洲发育,扇三角洲和辫状河三角洲主要沿断层活动弱的位置向断层活动强的位置进积;东二段,断层活动最终停止活动,盆地整体处于热沉降期,石臼坨凸起不再提供物源,主要发育来自外部物源的曲流河三角洲沉积。

5.2.3 断层活动对三角洲延伸长度及碎屑岩岩性的控制

利用录/测井、岩心、壁芯及三维地震等资料,在精细刻画古近系各沉积时期的扇三角洲、辫状河三角洲、曲流河三角洲展布范围的基础上,统计了各沉积时期扇三角洲和辫状河三角洲发育位置的断层活动速率以及扇三角洲的延伸长度,以及断层附近各沉积时期断层的活动速率及其对应的各井的中细砂岩、砂砾岩和总的砂岩的百分含量,绘制了断层活动速率与三角洲延伸长度、不同类型砂岩百分含量的关系图(图8,图9),在此基础上,分析了断层活动对三角洲延伸度、不同类型砂岩百分含量的控制作用。

结果表明,断层活动速率与三角洲延伸长度、砂岩百分含量均具有很好的对数关系。三角洲延伸长度随着边界断层活动的增强而变短,砂岩百分含量随着边界断层活动的减弱而增加。当断层活动较弱时,沉降中心远离断层发育,三角洲向沉降中心进积的距离变长,另外,三角洲往往沿着弱断层活动形成的高地势位置向强断层活动形成的低地势位置进积,因此,低地势的位置距离物源较近,造成了断层活动弱的位置砂岩百分含量高,断层活动强的位置,砂岩百分含量低。在三角洲发育的位置,断层活动越强,越有利于形成粒径

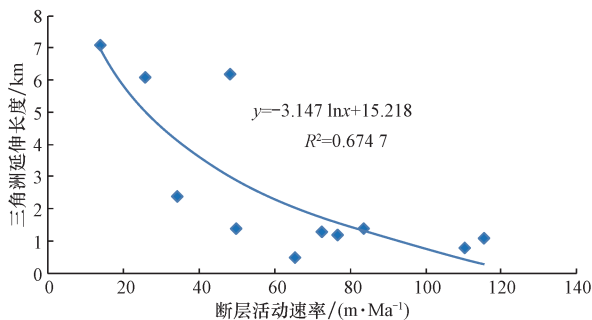


图8 秦南凹陷东南缘断层活动速率与三角洲延伸长度的关系

Fig. 8 Relationship between fault activity rate and delta extension length, southeastern margin of Qinnan Sag

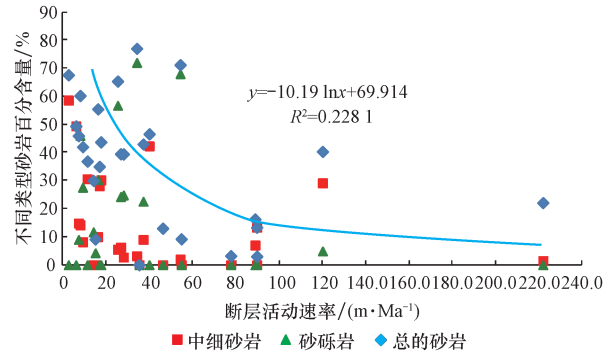


图9 秦南凹陷东南缘断层活动速率与砂岩百分含量的关系

Fig. 9 Relationship between fault activity rate and sandstone content, southeastern margin of Qinnan Sag

较大的砂砾岩(图9中的砂砾岩),反之,形成的砂岩粒径较小(图9中的中细砂岩)。

6 结论

1) 研究区古近系发育幕式构造活动,边界断层具有明显的分段性,在纵向上和平面上,断层活动既具有明显的差异性,又表现出一定的相似性。纵向上,孔店组至沙四段,边界断层开始活动,断层活动速率较小;沙三段,断层活动增强,断层活动速率增大;沙一二段,断层活动减弱,断层活动速率减小;东三段,断层活动再次增强,断层活动速率增大;东二段沉积期,断层活动逐渐减弱,末期停止活动;至东一段,断层停止活动。

2) 古近系时期,断层活动的变化控制了构造转换带的形成与演化;而断层的差异活动直接控制了剥蚀区与沉积区的差异升降作用,进而控制着物源区不同位置的剥蚀强度,古近系沉积期断层活动强的位置,物源区抬升速度快,剥蚀速度也快。

3) 同一时期边界断层活动性强的位置,沉降中心离断层较近。垂向上,沙三段沉积期,研究区中部边界断层活动较强,具有统一的沉降中心,且沉降中心靠近断层发育;沙一二段沉积期,断层活动减弱,且差异性活动明显,在断层活动强的位置发育范围较小的沉降中心,沉降中离断层较远;东三段沉积期,断层活动再次增强,但差异性活动明显,在断层活动强的位置发育沉降中心,沉降中心靠近断层发育;东二段沉积期,断层活动减弱,断层活动差异性明显,沉降中心靠近断层活动强的位置。另外,沙一+二段沉积期,构造转换带两侧断层差异活动易形成断槽。

4) 古近系沉积期,断层活动强的时期,扇三角洲

和湖泊发育,扇三角洲范围较小,如沙三段和东三段;断层活动弱的时期,扇三角洲、辫状河三角洲和曲流河三角洲发育,范围较大,如沙一+二段、东二段;三角洲的延伸长度随着断层活动性的增强而变长。同一沉积期,三角洲往往沿着弱断层活动的低势区向强断层活动的高势区进积,砂岩百分含量随和断层活动的增强具有逐渐减小的趋势。另外,在沙一+二段沉积期,构造转换带断层差异活动形成的断槽更有利于辫状河三角洲砂体的搬运和堆积。

参 考 文 献

- [1] 颜世永,吴智平,李月,等. 渤海湾盆地惠民凹陷临商断层特征及其活动机制[J]. 地质论评,2010,56(5):647-652.
Yan Shiyong, Wu Zhiping, Li Yue, et al. Characteristics and faulting mechanism of Linshang fault in the Huimin Sag, Bohai Bay Basin [J]. Geological Review, 2010, 56(5): 647-652.
- [2] 姜华,王华,刘军,赵淑娥,等. 珠江口盆地珠三坳陷神狐组-恩平组沉积时期南断裂活动性对沉积的控制作用[J]. 地质科技情报,2009,28(2):49-53.
Jiang Hua, Wang Hua, Liu Jun, et al. Activity of South Fault of Zhu III Depression and Its Controlling on Sedimentation during Shenhu Formation to Enping Formation in Pearl River Mouth Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 49-53.
- [3] 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 Depression and Its Controlling on Sedimentation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(1): 85-90.
- [4] 王华,姜华,林正良,等. 南堡凹陷东营组同沉积构造活动性与沉积格局的配置关系研究[J]. 地球科学与环境学报,2011,31(1):70-77.
Wang Hua, Jiang Hua, Lin Zhengliang, et al. Relations between synsedimentary tectonic activity and sedimentary framework of Dongying Formation in Nanpu Sag [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 31(1): 70-77.
- [5] 蔡佳,姜华,甘华军,等. 南阳凹陷南部边界大断裂活动性及其对沉积的控制[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(4):9-12.
Cai Jia, Jiang Hua, Gan Huajun, et al. Activities of the boundary major fault in the south of Nanyang Sag and their control effect on deposition [J]. Journal of Xian Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(4): 9-12.
- [6] 刘琴琴,黄传炎,金思丁,等. 福山凹陷美台断层活动特征及其对沉积的控制[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(4):51-59.
Liu Qinqin, Huang Chuanyan, Jin Siding, et al. Activity characteristics of meitai fault of Fushan Depression and its controlling on sedimentation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition) [J], 2015, 37(4): 51-59.
- [7] 赖维成,徐长贵,王晓刚,等. 秦南凹陷古近系层序地层和沉积体系研究及油气勘探方向探讨[J]. 中国海上油气,2007,19(5):300-305.
Lai Weicheng, Xu Changgui, Wang Xiaogang, et al. A study on Paleogene sequence stratigraphy and sedimentary systems and a discussion on hydrocarbon exploration directions in Qinnan depression [J]. China Offshore Oil And Gas, 2007, 19(5): 300-305.
- [8] 庄新兵,邹华耀,李楠,等. 秦南凹陷烃源岩特征与油气勘探新领域[J]. 断块油气田,2011,18(2):146-149.
Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Li Nan, et al. Characteristics of source rock and new region of oil and gas exploration in Qinnan Sag [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 146-149.
- [9] 杨海风,魏刚,王德英,等. 秦南凹陷秦皇岛 29-2 油气田原油来源及其勘探意义[J]. 油气地质与采收率,2011,18(6):28-31.
Yang Haifeng, Wei Gang, Wang Deying, et al. Oil sources and exploration significance of Qinhuangdao 29-2 oil-gas field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 146-149.
- [10] 魏刚,薛永安,柴永波,等. 秦南凹陷油气勘探思路创新与突破[J]. 中国海上油气,2012,24(3):7-11.
Wei Gang, Xue Yong'an, Chai Yongbo, et al. Philosophy innovations and a breakthrough in petroleum exploration in Qinnan sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(3): 7-11.
- [11] 庄新兵,邹华耀,李楠,等. 秦南地区天然气成因与油气勘探潜力分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(3):680-688.
Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Li Nan, et al. Origin of natural gas and exploration potential of hydrocarbon, Qinnan area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(3): 680-688.
- [12] 田立新,杨海风,王德英,等. 渤海海域古近系油气藏高含量 CO₂ 的成因及成藏期研究:以秦南凹陷 Q 油气田为例[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(2):673-678.
Tian Lixin, Yang Haifeng, Wang Deying, et al. Study on genesis of high contents of CO₂ and hydrocarbon accumulation period in Paleogene, Bohai Sea: An example in Q oil-gas field of Qinnan Sag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 673-678.
- [13] 王冠民,庞小军,张雪芳,等. 渤中凹陷古近系石南断层活动性及其对油气成藏条件的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):859-866.
Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Zhang Xuefang, et al. Activity of Shinnan fault and its control on hydrocarbon accumulation in the Paleogene in Bozhong Depression. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 859-866.
- [14] 夏庆龙,庞雄奇,姜福杰,等. 渤海海域渤中凹陷源控油气作用及有利勘探区域预测[J]. 石油与天然气地质,2009,30(4):398-404,411.
Xia Qinglong, Pang Xiongqi, Jiang Fujie, et al. Control of source rock on hydrocarbon accumulation and prediction of favorable plays in the Bozhong Depression of the Bohai Sea waters. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 398-404, 411.
- [15] 周心怀,牛成民,滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质,2009,30(4):469-475,482.
Zhou Xinhuai, Niu Chengming, Teng Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 469-475, 482.

(编辑 董立)