

文章编号:1672-6561(2012)01-0020-09

高邮凹陷断层控油气作用的多样性

高先志¹, 李 浩¹, 刘启东²

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司地质科学研究院, 江苏 扬州 225012)

摘要:在探讨高邮凹陷断层发育时期和分布特点的基础上,结合油气分布特点,分析了断层在油气成藏中的作用类型,并探讨了其作用机理。依据断层在油气生成、运移、聚集和分布环节中的作用,把断层分为控源断层、供烃断层、改向断层、成圈断层和调整破坏断层。控源断层控制有效烃源岩展布和生烃时期的早晚,高邮凹陷控源断层下降盘为有效烃源岩分布区,而且西部地区早于东部地区生烃;供烃断层控制油气主运移通道的走势,其陡断面和凸断面为高邮凹陷断裂带油气的主运移通道;改向断层影响油气的富集层位和油气富集区的位置,其对高邮凹陷油气分布的影响存在“分散”和“富集”两种效应;成圈断层控制圈闭的类型及分布;调整破坏断层导致圈闭充满程度和原油物性的改变,高邮凹陷调整破坏断层为盐城期和三垛期活动断层。高邮凹陷断层的多期性和多样性导致断层体系中各断层封闭性在时空上的差异性和多变性,从而形成对油气控制的多面性和复杂性。

关键词:断层;圈闭;烃源岩;油气;运移;聚集;封闭性;高邮凹陷

中图分类号:TE122.1;P618.13 **文献标志码:**A

Various effects of faults on generation, migration and accumulation of oil/gas in Gaoyou Sag

GAO Xian-zhi¹, LI Hao¹, LIU Qi-dong²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Geological Research Institute, Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Yangzhou 225012, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the analysis of fault activity periods, fault distribution characteristics and hydrocarbon occurrence, the various effects and mechanisms of faults on generation, migration, accumulation and distribution of hydrocarbons were discussed. According to the roles played in the whole process of hydrocarbons from source rocks to traps, the faults could be divided into five types. ①Faults that controlled the distribution of hydrocarbon source rocks and the period of hydrocarbon generation: the effective hydrocarbon source rocks were located in the downdip block of faults with earlier hydrocarbon generation in the western region than that in the eastern region of Gaoyou Sag; ②faults that connected with the hydrocarbon source rocks and controlled the oil/gas migration trends: the steep and convex sections of faults were the main pathways of oil/gas migration in the fault zone of Gaoyou Sag; ③faults that redirected the petroleum migration pathways and controlled the location of hydrocarbon occurrence: the faults caused that there were two opponent roles of distraction and concentration for oil/gas distribution in Gaoyou Sag; ④faults that controlled the types and distributions of various traps; ⑤faults that adjusted and destroyed the oil pools and controlled the enrichment and physical properties of petroleum in the traps: the faults were active during Yancheng Period and Sanduo Period in Gaoyou Sag.

收稿日期:2011-04-07

基金项目:中国石油化工股份有限公司“十一五”基础研究项目(P08045)

作者简介:高先志(1963-),男,山东荣成人,教授,博士研究生导师,从事石油和天然气地质学的教学和研究, E-mail:gaoxz@cup.edu.cn。

It was concluded that the multistage and diversity of faults in Gaoyou Sag resulted in the difference and variety of the sealing ability of faults in time and space, and played the complex and multiple roles on oil/gas migration and accumulation.

Key words: fault; trap; hydrocarbon source rock; oil/gas; migration; accumulation; sealing ability; Gaoyou Sag

0 引言

高邮凹陷是苏北盆地最重要的含油气凹陷,其断层十分发育。因此,在高邮凹陷油气勘探研究中,许多学者十分重视对断层的研究^[1-9]。然而其研究多集中在断层活动性及封闭性方面,对断层在高邮凹陷油气成藏作用性质和特点上的认识还不够清晰。为此,笔者在分析高邮凹陷断层发育时期和分布特点的基础上,结合油气分布特点,系统研究和梳理了断层在控油气方面的作用类型和特点,总结出高邮凹陷断层控油气多样性思想,以期对断层在油气成藏中的作用有更全面的认识,完善复杂断块油气成藏理论,并指导高邮凹陷油气精细勘探。

1 地质概况

高邮凹陷是位于苏北盆地南部的一个次级凹陷(图1),东起吴堡低凸起,西至菱塘桥低凸起,南为通扬隆起,北接柘垛低凸起,东西长约100 km,南北宽25~30 km,面积达2 670 km²。苏北盆地是在下

扬子构造形变极为复杂的古、中生界基础上发展演化形成的陆相断陷型含油气盆地。自晚白垩世以来,苏北盆地经历了多次构造运动(表1),高邮凹陷受区域构造运动和边界断层演化的影响,形成了北部斜坡带、中央深凹带和南部断阶带等3个构造单元,并在纵向上形成了三套生储盖组合。其中泰二段、阜二段下部和阜四段上部为烃源岩发育层段,泰

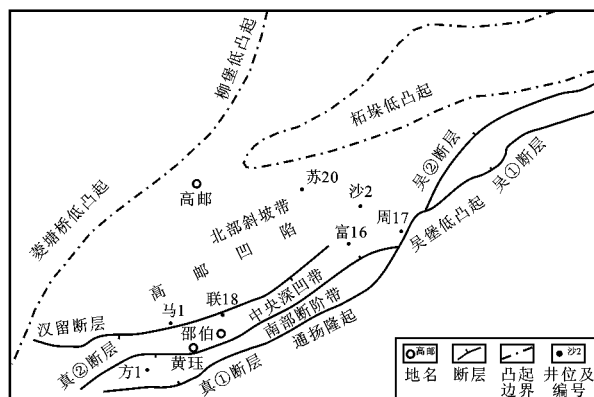


图 1 苏北盆地高邮凹陷构造略图

Fig. 1 Sketch tectonic map of Gaoyou Sag in Subei Basin

表 1 高邮凹陷中、新生代构造运动和地层

Tab. 1 Mesozoic and Cenozoic tectonisms and stratigraphy in Gaoyou Sag

地层系统				段	层位代号	地震反射界面	构造事件	生储盖组合		
界	系	统	组							
新生界	第四系	全新统一更新统	东台组		Q	T ₁ ¹ T ₂ ⁰ T ₂ ² T ₃ ² T ₄ ² T ₃ ⁰ T ₃ ¹ T ₃ ² T ₃ ³ T ₄ ³ T ₄ ⁰	盐城运动			
	新近系	上新统	盐城组	盐二段	Ny ₂ ³				三垛运动	
		中新统			Ny ₂ ¹⁺²					
				古近系	渐新统					
	始新统	三垛组	E ₂ ³							
			垛二段		E ₂ s ₂		吴堡运动	储集层		
					垛一段				E ₂ s ₁	
		戴南组	戴二段		E ₂ d ₂		储集层			
			戴一段		E ₂ d ₁					
			古新统		阜宁组			阜四段	E ₁ f ₄	源岩层
	阜三段							E ₁ f ₃	储集层	
	阜二段	E ₁ f ₂					源岩层			
	阜一段	E ₁ f ₁						储集层		
	中生界	白垩系		上白垩统						
			泰一段		K ₂ t ₁					
			赤山组				K ₂ c	储集层		
浦口组						K ₂ ρ				

注:波浪线表示上、下组之间为不整合面。

州组一段、阜宁组一段及三段、戴南组、三垛组为储集层主要发育层段。

2 断层特征

高邮凹陷断层十分发育,并且在不同层位和不同构造位置,断层发育时期和规模都有很大的不同,分布特点和组合特点也有差异。

2.1 断层活动时期

按照活动期次,高邮凹陷断层可分为仪征期—盐城期、吴堡期—盐城期和吴堡期—三垛期等长期

活动断层以及吴堡期、三垛期和盐城期等短期活动断层(图2、3)。从图2可见, T_3^0 反射界面(阜宁组顶界面)以上的上构造层断层多为三垛期断层; T_3^0 反射界面以下的下构造层断层多为吴堡期断层。

断层活动时期的早晚决定了其对油气是否起控制作用以及起控制作用类型的不同,因此可依据断层活动时期与大规模油气运移时间的先后关系将断层划分为早期断层、同期断层和晚期断层。吴堡期断层为早期断层,三垛期断层为同期断层,盐城期断层为晚期断层。

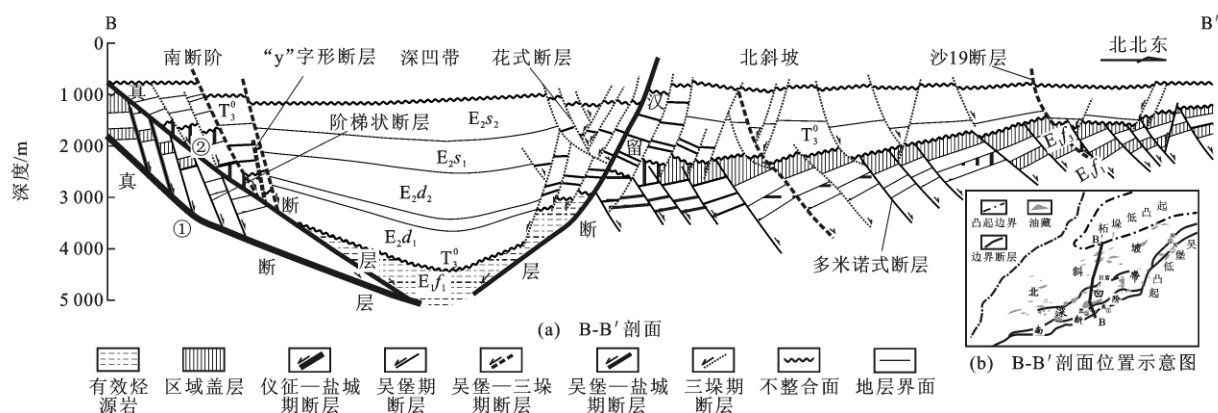


图2 高邮凹陷断层分布剖面

Fig. 2 Section of faults distribution in Gaoyou Sag

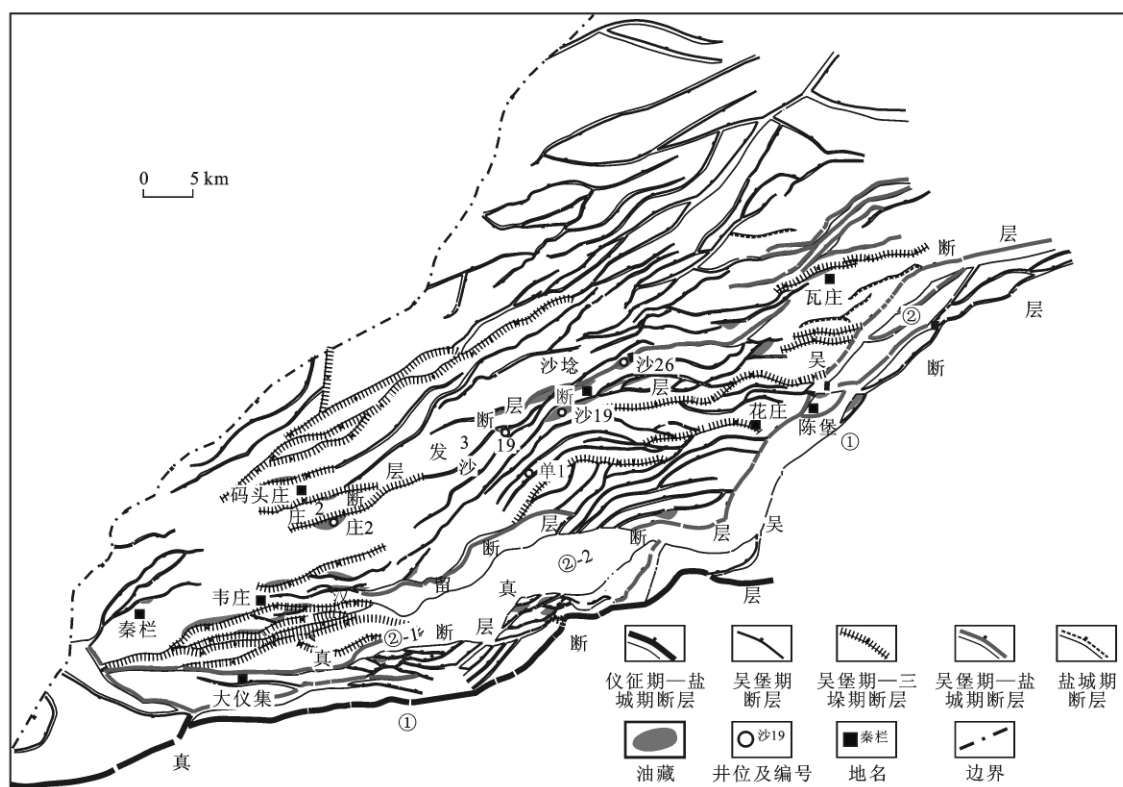


图3 高邮凹陷阜宁组断层平面分布特征

Fig. 3 Characteristics of faults horizontal distribution in Funing Formation of Gaoyou Sag

2.2 断层级别划分及其分布特点

按照断层发育规模,高邮凹陷断层可分为四级。一级断层包括吴①断层和真①断层,它们控制了高邮凹陷南断北超的箕状断陷结构(图 2);二级断层包括吴②断层、真②-1 断层、真②-2 断层和汉留断层,它们控制了高邮凹陷南北分带、东西分区的构造格局以及三四级断层的展布特点(图 2、3)。上述一、二级断层断距大,为 700~3 500 m,平面延伸距离远,一般大于 40 km。

从断层倾向看,北倾向断层主要分布在凹陷东缘,在靠近凹陷南部边界断层绝大多数为西北倾向,而在凹陷中部及北部则南东倾向断层相对增加^[6]。高邮凹陷断层走向基本为北东、北东东或东西向展布,以北东东向密度最大(图 3)。

2.3 断层剖面组合样式

高邮凹陷断层在剖面上可分为阶梯状、多米诺式、“y”字形和花式等 4 种组合样式。前两种主要发育在下构造层,后两种主要发育在上构造层。阶梯状断层组合主要分布在南部断阶带阜宁组地层中;多米诺式断层组合主要分布在北部斜坡带;“y”字形断层组合在盆地边界发育较多;花式断层组合主要分布在汉留断裂带(图 2)。这些不同组合样式影响着油气输导体系结构样式和油气藏纵向分布模式。

3 断层对油气的控制作用

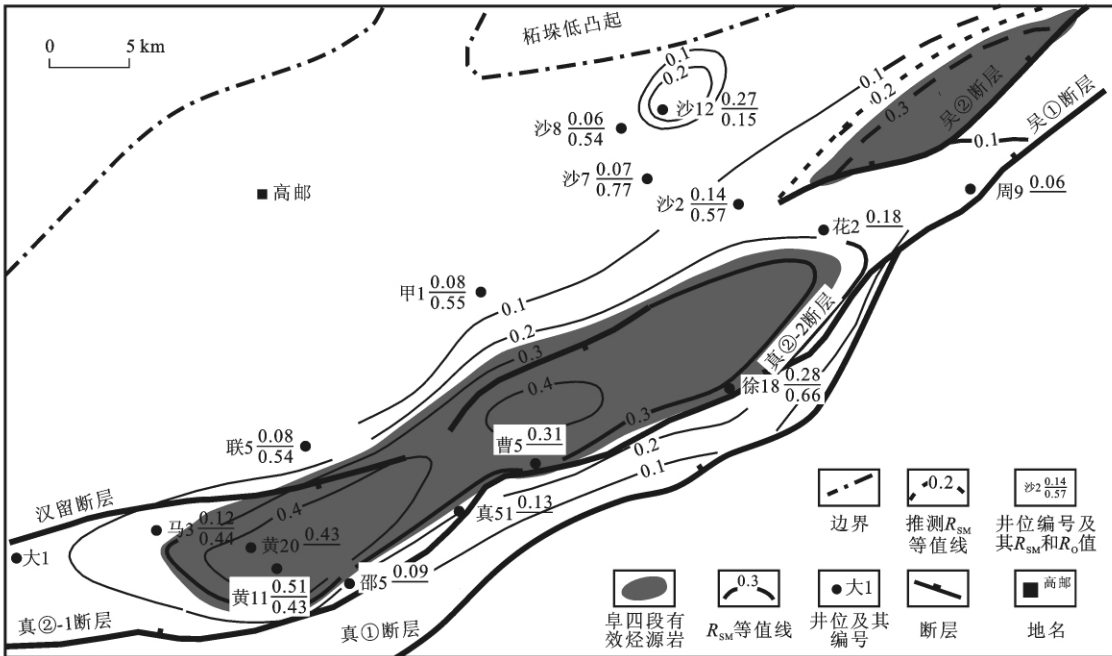
许多学者研究表明,断层对油气的生成、运移、聚集和分布有重要的控制作用,并且断层控油气作用具有明显的时空性,一条断层在不同位置(纵向上和横向上)以及不同时期对油气控制作用的性质和能力可能是变化的,或者可能同时起到多种控制作用^[10-13]。断层的这些作用在高邮凹陷都有体现。据高邮凹陷断层对油气在生成、运移、聚集和分布等环节所表现的主要控制作用,可将高邮凹陷断层划分为控源断层、供烃断层、改向断层、成圈断层以及调整破坏断层。

3.1 控源断层对有效烃源岩的控制作用

控源断层是指对烃源岩的形成、演化、分布位置和规模有重要控制作用的断层,它一般为控洼槽断层,发育规模大,具有长期活动的特点。

高邮凹陷的控源断层包括吴①断层、真①断层、真②-1 断层和真②-2 断层以及吴②断层和汉留断层。这些断层基本控制了洼槽带的展布,影响着烃源岩演化进程,控制了成熟烃源岩主要分布范围。

图 4 为高邮凹陷阜四段有效烃源岩分布图。从图 4 可见:一方面,有效烃源岩的分布主要沿上述控源断层下降盘分布;另一方面,控源断层控制了有效烃源岩生烃时间。控源断层活动性控制了次洼烃源



注: R_{SM} 是 20S-24-乙基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷峰面积和 20R-24-乙基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷与 20S-24-乙基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷峰面积之和的比值; R_o 为镜质体反射率/%;井位编号右上角是该井的 R_{SM} 值,右下角是该井的 R_o 值,部分井位缺失 R_o 值。

图 4 高邮凹陷阜四段有效烃源岩分布

Fig. 4 Distribution of effective hydrocarbon source rocks of the fourth member of Funing Formation in Gaoyou Sag

岩层的埋藏深度,从而决定了烃源岩的生烃演化历史。图 5、6 分别表示了邵伯、樊川和刘五舍 3 个次洼的控注断层活动性及 3 个次洼中阜四段烃源岩的演化历史。从图 5、6 可见,吴堡运动(距今 53 Ma)真②-2 断层在戴一段和戴二段地层沉积期断层活动绝对速率和落差都较大,且西段大于东段,这种差别造成了西部的邵伯次洼阜四段烃源岩开始生烃时间早于东部的樊川次洼和刘五舍次洼,体现了控源断层时空演化的不均衡性,决定了不同次洼的烃源岩成熟度演化的差异性。

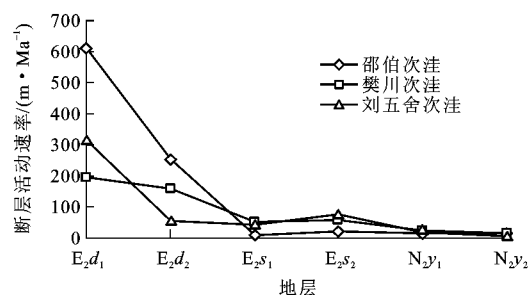


图 5 真②-2 断层在不同次洼的活动史

Fig. 5 Activity histories of Zhen②-2 Fault in different sub-sags of Gaoyou Sag

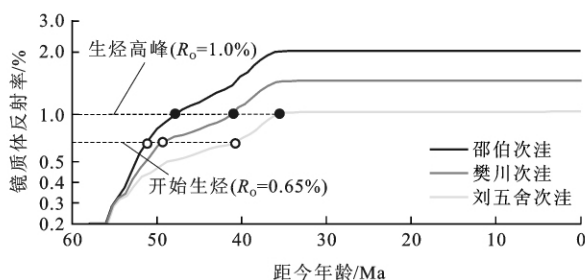


图 6 高邮凹陷不同次洼阜四段烃源岩生烃史

Fig. 6 Hydrocarbon generation histories of hydrocarbon source rocks in the fourth member of Funing Formation in different sub-sags of Gaoyou Sag

3.2 供烃断层对油气运移的控制作用

供烃断层(又称油源断层)是指那些沟通有效烃源岩并导致油气从烃源岩向源外运移的断层。供烃断层主要为分布在烃源岩分布区的大断层,一般控源断层(控注断层)本身是供烃断层;另外,烃源岩层上部发育的深大断层也起到供烃断层的作用。供烃断层对油气运移的控制作用体现在两个方面:①控制了主运移通道的走势;②有利于油气的快速成藏。

3.2.1 供烃断层断面形态控制了主运移通道和油气富集位置

供烃断层的断面形态控制油气主运移通道。一般而言,断面越陡,断层输导油气的动力越大,同时凸断面脊线易形成油气汇聚流^[14],陡断面和凸断面脊线为油气主运移通道。图 7 为高邮凹陷供烃断层断面构造形态与戴南组油气藏分布叠合图。从图 7 可见,油气主要分布在陡断面和凸断面脊线部位,体现了供烃断层的空间几何形态控制区带油气富集。

3.2.2 供烃断层有利于油气的快速成藏

供烃断层输导油气具有快速、高效的特征^[15],这在高邮凹陷也得到很好的体现。高邮凹陷断裂带油藏的主要输导通道为断层,其储层中与烃类包裹体共生的盐水包裹体测温资料用于模拟油气充注时限,其时限只有 1~3 Ma(表 2),这说明供烃断层输导油气聚集成藏是在较短时间内完成的。

供烃断层附近垂向分布的系列油藏中含氮化合物的组成也能说明其快速成藏特点。一般而言,原油密度和弱极性含氮化合物的相对含量随油气运移距离的增加而增加^[16-17]。图 8 为真②-1 和汉留 2 个供烃断层附近油藏中的含氮化合物分布。从图 8 可见,断层附近垂向呈串珠状分布的系列油气藏以及同一侧断层的油气藏从下往上原油密度和极性弱的

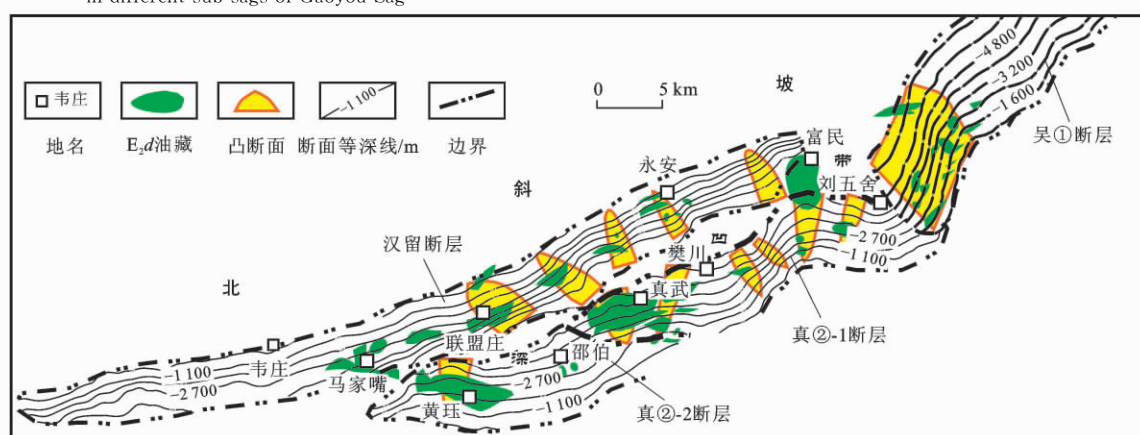


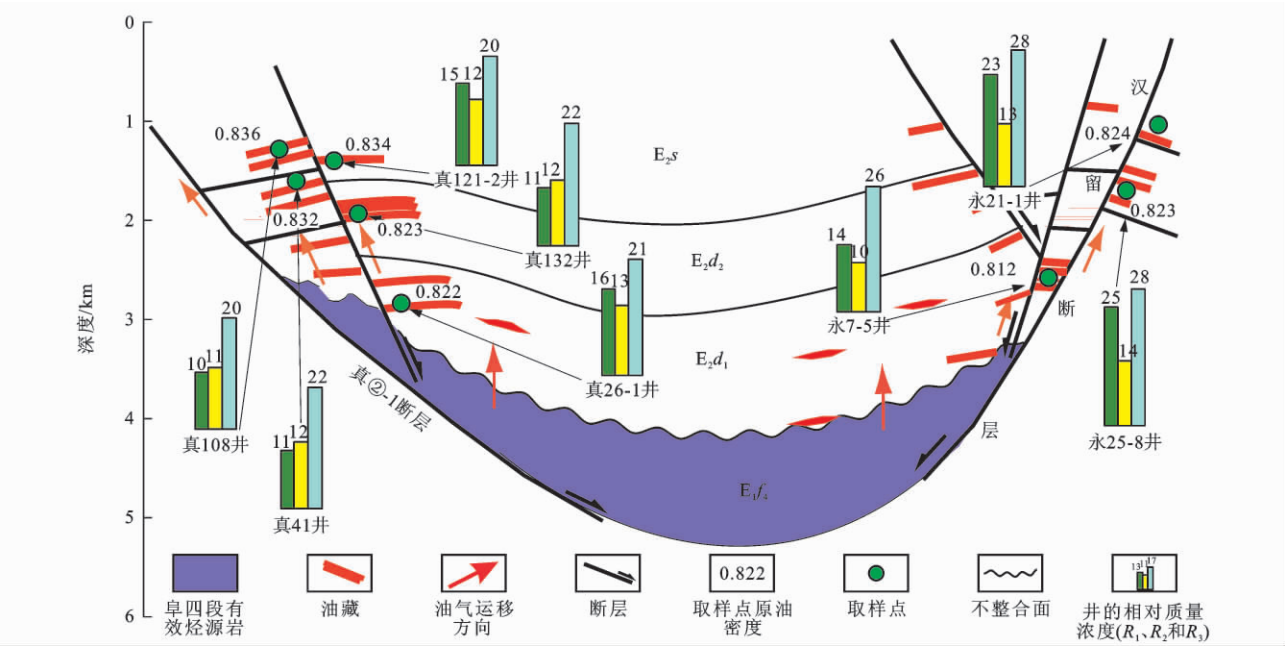
图 7 高邮凹陷主要供烃断层断面形态和油气分布

Fig. 7 Section morphology and oil/gas distribution of the main faults supplying hydrocarbon in Gaoyou Sag

表 2 高邮凹陷油气成藏时间
Tab. 2 Accumulation times of oil/gas in Gaoyou Sag

油田	井号	层位代号	样品点深度/m	包裹体均一化温度/℃	充注时间/Ma	充注时限/Ma	供烃断层
周庄	周 36	E ₂ d ₁	2 300.00	75~95	36.9~38.6	1.7	吴①断层
真武	真 100	E ₂ d ₂	2 340.90	76~94	37.3~38.9	1.6	真②-1 断层
肖刘庄	肖 9	E ₂ s ₁	2 789.82	92~106	36.9~37.8	0.9	纪③断层
花庄	花 1	E ₂ s ₁	1 977.80	61~87	37.1~38.6	1.5	汉留断层
富民	富 38	E ₂ s ₁	2 041.84	61~76	37.8~39.0	1.2	汉留断层
富民	富 38	E ₂ d ₂	2 532.00	82~86	39.0~39.7	0.7	汉留断层
富民	富 38	E ₂ d ₁	3 072.74	97~120	37.2~39.6	2.4	汉留断层
马家嘴	马 3	E ₂ d ₁	1 747.20	88,92,98,106	37.0~39.0	2.0	汉留断层
马家嘴	马 35	E ₂ d ₂	1 336.70	79,90~99	38.0~40.0	2.0	真②-2 断层

注:充注时间表示油气从输导层向圈闭大规模充注的时间;充注时限表示油气大规模连续充注过程的时间长度。



注:取样点原油密度单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;井的相对质量浓度柱状图对应变量从左往右分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 ; R_1 为弱极性的 1,8-二甲基卡唑与强极性的 2,4-二甲基卡唑的质量浓度比值乘以 10; R_2 为弱极性的 1,8-二甲基卡唑与二甲基卡唑的质量浓度比值乘以 100; R_3 为弱极性的 1,8-二甲基卡唑与较强极性的半裸型二甲基卡唑的质量浓度比值乘以 100。

图 8 高邮凹陷断裂带油气运移剖面
Fig. 8 Section of oil/gas migration in the fault zone of Gaoyou Sag

含氮化合物相对质量浓度并没有明显变化,这间接说明供烃断层输导油气的快速高效性,从而导致各油藏原油分异不明显。

3.3 改向断层影响油气分布区和层位

改向断层是指位于油气运移的路线上并使油气运移方向发生改变的断层。改向断层的实质是由于不封闭断层的通道作用,导致油气沿断层运移从而调整了输导油气的层位和运移方向。因此,输导断层与不同产状和结构的输导地层可组合成不同的输导油气样式,从而起到不同的改向作用,并形成不同的运移聚集模式(图 9)。

高邮凹陷上构造层花式组合断层多为改向断层,如汉留断裂带永安地区的多组断层;下构造层的多米诺式组合断层错动了其顶部的阜二段烃源岩,改变了油气在阜宁组储集层的运移层位,也属于改向断层。改向断层组合导致不同的改向效果,并控制了高邮凹陷油气分布区和分布层位。

(1)阜四段区域盖层之上的上构造层花式组合断层导致油气呈“放射状”向上运移。这种组合形式的改向断层扩大了油气运移空间,不利于油气富集[图 9(a)]。正是由于改向断层的存在,造成永 20 断块以北地区少有油气分布。

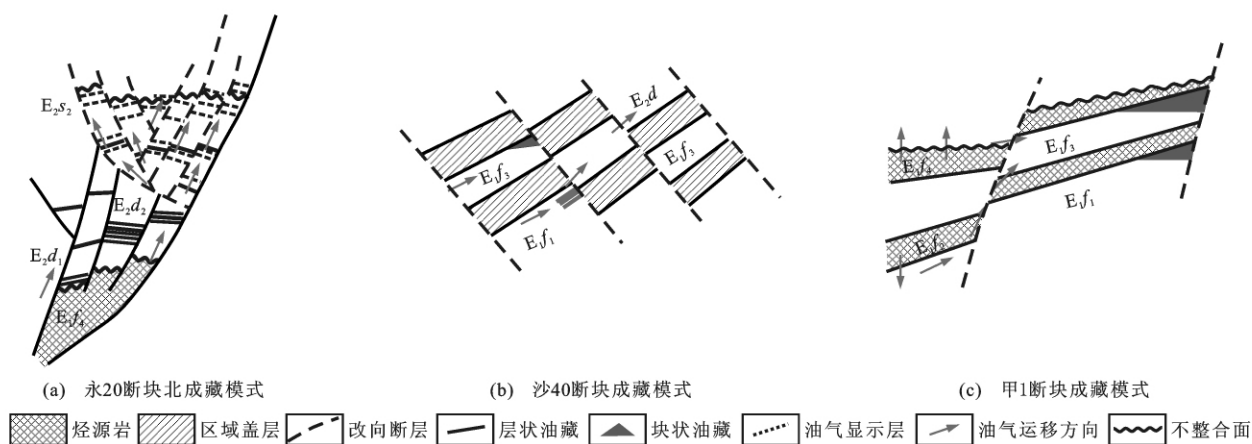


图9 高邮凹陷改向断层控油气成藏模式

Fig. 9 Accumulation models of oil/gas controlled by adjusting faults in Gaoyou Sag

(2) 阜四段区域盖层之下的多米诺式反向断层组合使得油气逐步向上部新层段运移, 由于反向断层改向作用, 造成油气泄漏于区域盖层之上, 表现出分散油气的效应[图 9(b)], 如沙 26 断块阜一段油气向沙 40 断块阜三段油藏的改向运移。

(3) 阜四段区域盖层之下多米诺式顺向断层组合可使得油气向对盘上部老地层运移。由于顺向断层调节作用发生在区域盖层之下, 这样能汇聚多套源岩生成的油气, 起到集中油气的“富集效应”作用[图 9(c)]。这种现象在深凹带两侧和内斜坡地区较为普遍, 如南断阶和沙埕内坡地区可能汇聚了阜四段和阜二段烃源岩生成的油气。

3.4 成圈断层的封闭性控制圈闭有效性

成圈断层是指能形成圈闭的断层。高邮凹陷分布两类与断层有关的圈闭: 一类是形成断背斜、断鼻、断块等构造圈闭, 形成这类圈闭的断层主要分布在高邮凹陷中东部的沙埕、瓦庄、陈堡、真武、富民和永安等地区; 另一类是形成断层-岩性复合圈闭, 形成这类圈闭的断层主要分布在高邮凹陷西部的黄珏、马家嘴和联盟庄等地区。

断层能否形成圈闭主要取决于断层的封闭性。从封油气机理看, 断层封闭与否是由断裂带的排替压力与烃类浮力之差所决定^[18-19]。许多学者对断层封闭机理、影响因素及断层封闭性的评价方法进行过论述和探索^[20-28]。高邮凹陷断层封闭性研究结果表明, 地层砂岩含量(砂层厚度与地层总厚度的比值)是评价断层封闭性的有效参数。遮挡盘砂岩含量小于 18% 的地层段断层完全封闭; 遮挡盘砂岩含量超过 37% 的地层段断层则完全开启; 遮挡盘砂岩含量为 18%~37% 的地层段断层封闭性不确定^[6,8]。

断层封闭性具有时空变化性, 即在不同时期同

一条断层在不同位置的封闭性都可能不同。这意味着不同时期和不同位置的断层圈闭有效性可能有很大差异。以周 41 断块油藏为例, 其遮挡断层为吴①断层, 泰一段三套砂层组厚度都较大, 横向连通性和物性都好, 但只有泰一段二亚段和一亚段底部油气富集, 主要因为该段储层对置盘的砂岩含量小于 20%, 而泰一段一亚段上部和三亚段的储层对置盘的砂岩含量都大于 30%, 吴①断层在泰一段二亚段的封闭性明显好于一亚段和三亚段(图 10)。

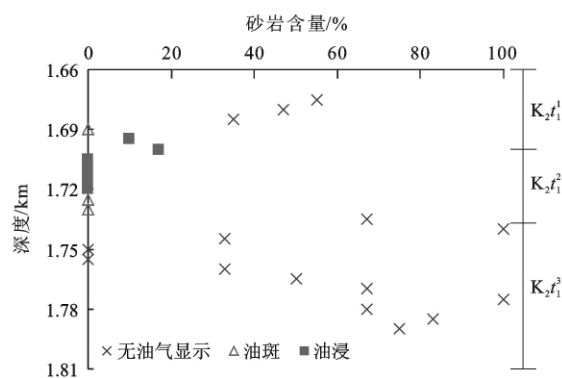


图10 周41断块泰一段油气显示与吴①断层对置盘砂岩含量关系

Fig. 10 Relationship of oil/gas shows in the first member of Taizhou Formation in Zhou41 Fault Block to the sand percentages of downside in Wu① Fault

3.5 断层对油气藏的调整破坏作用

断层调整破坏油气藏是指断层对已经形成的油气藏产生破坏性影响而导致油气完全流失或不完全泄露。对油气藏调整破坏的断层既可以是油气藏形成以后因构造运动新产生的切割油气藏的断层, 也可以是再活动的老断层。断层对油气藏的调整和破坏从本质上是由于新生断层或老断层再活动而导致断层封闭性变差或断层完全不封闭。油气藏被调整

破坏后,从原油气藏泄露的油气还可在浅层的有效圈闭中形成次生油气藏。

对高邮凹陷油气藏有调整破坏作用的断层多为三垛期和盐城期活动的断层,其中主要为三垛运动时期复活的三级断层,如下构造层中的“开窗”断层(顶部切割 T_3^3 反射层的断层)以及长期活动的一、二级大断层,如吴①断层和汉留断层。

次生油藏与被调整后的油藏间在原油密度和圈闭充满度方面具有关联性,即次生油藏中原油密度一般比调整后油藏的原油密度要轻,调整后的油气藏圈闭体积充满度(体积分数)都小于 100%。如沙 19 断层控制的阜一段和阜三段断块油藏(图 2、表 3)的上部油藏(阜三段油藏)原油密度为 0.839 g/cm^3 ,比下部油藏(阜一段油藏)原油密度(0.885 g/cm^3)小;

上部油藏圈闭体积充满度为 100%,而下部油藏的圈闭体积充满度只有 54%。产生这种现象的原因是,再活动断层的封闭性减弱导致油气向上渗漏,称为断层的“弱封闭泄漏作用”。沙 19 断层为“开窗断层”,三垛期导致沙 19 断层复活,从而使断层封闭性变差,其断层封闭能力小于原来油气柱向上的浮力,油藏上部的油气会率先通过断层向上运移到阜三段圈闭中,直到阜一段油藏中的断层封闭性与剩余油柱浮力达到新的平衡。由于油气泄漏,在没有新的油气快速补给时,阜一段油藏必然出现圈闭充满度减小($<100\%$);另外,由于油藏内烃类组成的非均质性,油藏顶部油气密度总是比油藏下部油气密度小,所以顶部油气率先通过断层不断泄漏必然会导致被调整油藏中原油密度越来越大。

表 3 高邮凹陷沙 19 断块油藏特征统计

Tab. 3 Statistical results of characteristics of oil/gas reservoirs in Sha19 Fault Block of Gaoyou Sag

油藏	层位 代号	圈闭 类型	圈闭 面积/ km^2	闭合 高度/m	含油 面积/ km^2	油柱 高度/m	体积充满 度/%	原油密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	原油黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
沙 19 断块	E_1f_3	断鼻	0.4	100	0.4	100	100	0.839	24.6
沙 19 断块	E_1f_1	断鼻	1.6	120	1.3	80	54	0.885	110.5

4 结 语

高邮凹陷断层十分发育,其多期性和多样性发育特点在时空上形成了对油气生成、运移、聚集和分布控制的多面性和复杂性。根据断层控油气作用的性质,可把断层分为控源断层、供烃断层、改向断层、成圈断层和调整破坏断层。控源断层控制有效烃源岩展布和生烃时期的早晚;供烃断层控制油气主运移通道的走势;改向断层影响油气的富集层位和油气富集区的位置;成圈断层控制圈闭的类型及分布;调整破坏断层导致圈闭充满程度和原油物理性质的改变。断层在高邮凹陷油气成藏中具重要地位,其油气藏形成是“成也断层,败也断层”,“断层不是万能的,但没有断层是万万不能的”;因此,深入研究不同断层在不同时期和不同位置时的作用性质对高邮凹陷精细油气勘探有重要意义。

参 考 文 献 :

References :

[1] 曹 冰,刘小燕,熊学洲.断层在高邮凹陷复杂断块区成藏中的作用[J].江汉石油学院学报,2003,25(增):3-4.
CAO Bing,LIU Xiao-yan,XIONG Xue-zhou. Function of fault in forming reservoirs in complex fault block in Gaoyou Sag [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute,2003,25(S):3-4. (in Chinese)

[2] 邱贻博,查 明,曲江秀.高邮凹陷陈堡及陈堡东地区断层封闭性研究[J].石油勘探与开发,2007,34(2):197-201.
QIU Yi-bo,ZHA Ming,QU Jiang-xiu. Fault sealing performance in Chenbao and eastern Chenbao areas, Gaoyou Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 197-201. (in Chinese)

[3] 李储华,刘启东,陈平原,等.高邮凹陷瓦庄东地区断层封闭性多方法对比研究[J].中国西部油气地质,2007,3(1):65-68.
LI Chu-hua,LIU Qi-dong,CHEN Ping-yuan,et al. Synthetic study of fault sealing property in Wazhuangdong Area, Gaoyou Sag[J]. West China Petroleum Geosciences,2007,3(1): 65-68. (in Chinese)

[4] 李学慧.高邮凹陷南断阶断层活动对油气成藏的控制[J].新疆石油地质,2008,29(6):719-721.
LI Xue-hui. The control effect of fault activity on hydrocarbon accumulation in south terrace of Gaoyou Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2008,29(6):719-721. (in Chinese)

[5] 张克鑫,漆家福,任红民,等.苏北盆地高邮凹陷断层演化规律研究[J].大庆石油地质与开发,2008,27(2):21-24.
ZHANG Ke-xin,QI Jia-fu,REN Hong-min,et al. Study on faults evolution fault depression of Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing,2008,27(2):21-24. (in Chinese)

[6] 刘玉瑞.苏北盆地断层封堵类型及定量评价[J].石油实验地质,2009,31(5):531-536.
LIU Yu-rui. Quantitative evaluation of fault sealing mode and capacity in the Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,2009,31(5):531-536. (in Chinese)

- [7] 陈莉琼,李 浩,刘启东,等.高邮凹陷吴堡断裂构造带对陈堡油田油气运移的控制作用[J].地球学报,2009,30(3):404-412.
CHEN Li-qiong, LI Hao, LIU Qi-dong, et al. Control of the Wubao faulted structure over the migration of petroleum in the Chenbao Oilfield of the Gaoyou Sag, Jiangsu[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(3): 404-412. (in Chinese)
- [8] 刘启东,李储华,卢黎霞.高邮凹陷断层封闭性研究[J].石油天然气学报,2010,32(2):58-61.
LIU Qi-dong, LI Chu-hua, LU Li-xia. Study on the fault sealing properties in Gaoyou Sag[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 58-61. (in Chinese)
- [9] 江 夏,周荔青.苏北盆地富油气凹陷形成与分布特征[J].石油实验地质,2010,32(4):319-325.
JIANG Xia, ZHOU Li-qing. Characteristics of formation and distribution of prolific sags in the northern Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(4): 319-325. (in Chinese)
- [10] GALEAZZI J S. Structural and stratigraphic evolution of the western Malvinas Basin, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(4): 596-636.
- [11] 罗 群,姜振学,庞雄奇.断裂控藏机理与模式[M].北京:石油工业出版社,2007.
LUO Qun, JIANG Zhen-xue, PANG Xiong-qi. Reservoir mechanism and patterns of hydrocarbon controlled by fault [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 罗 群.断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义[J].石油勘探与开发,2010,37(3):316-324.
LUO Qun. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 316-324. (in Chinese)
- [13] 王 蛟,束青林.孤岛油田西南缘馆下段断层封闭性与油气成藏[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(5):47-53.
WANG Jiao, SHU Qing-lin. Fault sealing ability and hydrocarbon accumulation of the lower member of Guantao Formation in southwestern Gudao Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2010, 32(5): 47-53. (in Chinese)
- [14] HINDLE A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [15] 尚尔杰,金之钧,丁文龙,等.断裂控油的物理模拟实验研究——以准噶尔盆地西北缘红车断裂带为例[J].石油实验地质,2005,27(4):414-418.
SHANG Er-jie, JIN Zhi-jun, DING Wen-long, et al. Study on physical simulation experiment for the controlling of faults to oil—taking the Hongche Faults in the northwest of Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(4): 414-418. (in Chinese)
- [16] 李素梅,王铁冠,张爱云.地质体中的有机氮化合物及其在油藏地球化学中的应用[J].地质地球化学,1999,27(1):100-107.
LI Su-mei, WANG Tie-guan, ZHANG Ai-yun. Characteristics of organonitrogen compounds in geologic bodies and their application in oil reservoir geochemistry[J]. Geology Geochemistry, 1999, 27(1): 100-107. (in Chinese)
- [17] LARTER S R, BOWLER B F J, LI M, et al. Molecular indicators of secondary oil migration distances[J]. Nature, 1996, 383: 593-597.
- [18] SMITH D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana gulf coast salt basin[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(2): 145-172.
- [19] BOUVIER J D, KAARS-SIJPESTEIJN C H, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(11): 1397-1414.
- [20] ALLAN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(7): 803-811.
- [21] ALLAN P A, ALLEN J R. Basin analysis: principles and applications[M]. London: Blackwell Scientific Publishing, 1990.
- [22] KNIPE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(2): 187-195.
- [23] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [24] KNOTT S D K. Fault seal analysis in the North Sea[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 778-792.
- [25] 李宏义,姜振学,董月霞,等.断层封闭能力的有限性研究及模拟实验[J].石油实验地质,2010,32(6):583-587.
LI Hong-yi, JIANG Zhen-xue, DONG Yue-xia, et al. Geological study and physical simulation experiment on the limitation of fault-sealing [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(6): 583-587. (in Chinese)
- [26] 罗 群.断裂带的输导与封闭性及其控藏特征[J].石油实验地质,2011,33(5):474-479.
LUO Qun. Transporting and sealing capacity of fault belt and its controlling on reservoir[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(5): 474-479. (in Chinese)
- [27] 冯 冲,黄志龙,童传新,等.莺歌海盆地莺歌海组二段泥岩盖层封闭性综合评价[J].地球科学与环境学报,2011,33(4):373-377.
FENG Chong, HUANG Zhi-long, TONG Chuan-xin, et al. Comprehensive evaluation on the sealing ability of mudstone cap rock in member 2 of Yinggehai Formation of Yinggehai Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 373-377. (in Chinese)
- [28] 王 欢,王 琪,张功成,等.琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价[J].地球科学与环境学报,2011,33(2):152-158.
WANG Huan, WANG Qi, ZHANG Gong-cheng, et al. Comprehensive evaluation on the sealing ability of mudstone caprock in Meishan Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 152-158. (in Chinese)