

渤海湾盆地东濮凹陷南部地区古水动力演化与油气运聚

焦大庆¹,李梅²,慕小水¹,徐田武¹

(1. 中国石化中原油田分公司,河南濮阳 457001; 2. 浙江大学海洋地质与资源研究所,浙江杭州 310058)

摘要:油气的运移、聚集与地下水动力场密切相关。从古水动力场演化角度分析东濮凹陷南部油气运聚机理,流体流动与断裂开启性之间的匹配关系,并利用流体包裹体均一温度数据,结合研究区热演化史和生烃史特征分析了油气藏形成时间,恢复其油气充注过程。结果表明:研究区可划分为3个水动力单元:东、西次凹带发育泥岩压实水离心流;兰聊断裂带发育大气水下渗向心流;中央隆起带位于东西两侧离心流汇合越流泄水区,是油气聚集成藏的有利区域。东营组沉积期是石油最主要的运移、聚集期,该阶段油气主要聚集在中央隆起带断层下盘的底部;东营运动抬升剥蚀期是石油的主要调整运移期。早期形成的深层油气藏向构造高部位的顶部运移调整,重新聚集形成浅层次生油藏;馆陶组-明化镇组沉积期为天然气主成藏期,断层封闭性增强,天然气聚集在构造翼部的深部地层,形成“上油下气、顶油边气”的分布格局。

关键词:地层水;上油下气;水动力;油气充注;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Evolution of paleo-hydrodynamics and hydrocarbon migration and accumulation in southern Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Jiao Daqing¹, Li Mei², Mu Xiaoshui¹, Xu Tianwu¹

(1. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 2. Institute of Marine Geology and Resources, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Hydrocarbon migration and accumulation are closely related with hydrodynamic field. In this paper, the hydrocarbon migration and accumulation mechanism of southern Dongpu Sag was analyzed in respect of the paleo-hydrodynamic evolution. Forming time of hydrocarbon reservoir was determined by analyzing the homogenization temperature of fluid inclusions, and then hydrocarbon charging process was restored. The results show that there are three hydrodynamic units in southern Dongpu Sag: centrifugal flow of mudstone compaction-released water developed in the east and west sub-sags, centripetal flow of meteoric water occurred in the Lanliao fault belt, and cross-formational flow and discharge area in the central uplifted belt. The latter is the most favorable place for hydrocarbon accumulation. The sedimentary period of Dongying Formation (Ed) was the primary stage for hydrocarbon migrating to and accumulating in the bottom of down-thrown blocks of faults. The stage of Dongying tectonic uplifting was the main period of hydrocarbon adjustment. Hydrocarbons from the deep reservoirs formed in early stage remigrated to and accumulated in the shallow layers on structural high, forming the secondary oil reservoirs. The Guantao and Minghuazhen were the main periods for gas accumulation. Natural gas mainly accumulated in the deep strata of structural limbs, owing to the increasing sealing ability of faults, resulting in the “upper oil lower gas, top oil marginal gas” hydrocarbon distribution pattern.

Key words: formation water, upper oil-lower gas, hydrodynamic, hydrocarbon charging, Bohai Bay Basin

通常,根据油气差异聚集原理,在同一构造内气聚集在构造高部位,而油富集在构造低部位。但东濮凹陷南部地区油气分布刚好相反,呈“上油下气,顶油边气”的分布状态。东濮凹陷复杂断块发育,构造活动频繁,油气运移距离较短且多在断层下盘纵向排列富集,形成“一把刷子”的油气成藏模式。前人就东濮凹陷油气运聚规律已经做了很多的研究工作^[1-3],但关于东濮凹陷南部地区油气田“上油下气”的油气分布特

征和“一把刷子”的油气成藏模式的形成机理,至今仍未有统一的解释。

沉积盆地中油气通常与地下水相伴生,地下水是油气运移、聚集的动力和载体,油气成藏是地下水在地质进程中循环活动的产物^[4]。Munn于1909年最先提出了“油气聚集的水力学说”^[5]。Rich^[6](1921)认为,在泄水区,背斜或其它的构造可以成为来自各个方向地层流体(包括油气)汇集的中心,因而成为油气聚集

收稿日期:2014-04-05;修订日期:2014-06-20。

第一作者简介:焦大庆(1961—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质和油气勘探。

通讯作者简介:李梅(1983—),女,博士后,石油地质。E-mail:limei513@zju.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006-004),(2011ZX05002-006-003HZ)。

的位置。Hubbert^[7]在1940年第一次出版了关于地下水运动理论的经典著作,并用精确的数学术语论述了开阔盆地中地下水的流动,提出了油气由高势区向低势区运移^[8],在油气勘探的水文地质运用方面迈出了重要的一步。可见,油气的运移、聚集与地下水动力场有密切的关系。其中,压实流是油气运移的良好动力和载体,其发育时是油气运聚、成藏的最主要阶段,而大气水下渗向心流则对油气的运聚有一定的破坏、调整和控制作用,因此,压实流汇聚形成的越流泄水区及压实流与大气水下渗向心流汇合形成的越流泄水区均有利于油气运移聚集,而以大气水下渗为主的地区,总体上不利于油气的保存和聚集。区域地下水动力对于认识沉积盆地的演化、流体运移、油气聚集和矿床的形成是非常重要的^[9-15]。

本文从流体角度分析东濮凹陷南部地区古水动力场演化规律、流体流动与断裂开启性之间的匹配关系,通过流体包裹体均一温度数据,结合该区热演化史和生烃史特征,分析了桥口油田和马厂油田油气藏形成时间,恢复重建油气充注过程,尝试解释“上油下气”的油气分布特征和“一把刷子”的油气成藏模式的形成机理。

1 地质背景

东濮凹陷位于渤海湾盆地南缘临清坳陷的东南部,东侧以兰聊断裂与鲁西隆起为界,西侧超覆于内黄隆起上,南隔兰考凸起与开封坳陷相望,北以马陵断层与莘县凹陷相连(图1)。凹陷呈北北东走向,北窄(18 km)南宽(62 km),长约145 km,新近系分布面积约5 300 km²。东濮凹陷是以古生界-中生界为基底,以新生界为盖层的断陷沉积盆地,在构造演化及沉积相带上具有明显的“南北分区、东西分带”的特征,是一个早期箕状东断西超、晚期双断式的凹陷。

湖盆经历了单断、双断和整体沉降3个阶段^[16]。基底地层包括下古生界海相碳酸盐岩、上古生界海陆交互相含煤碎屑岩和中生界红色砂泥岩,总厚度近3 000 m。新生界包括古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组,总厚度达8 000 m。其中沙河街组厚度在5 000 m左右,自下而上可分为4段(表1):沙(沙河街组)四段(E_s^4)、沙三段(E_s^3)、沙二段(E_s^2)和沙一段(E_s^1)。

东濮凹陷近东西方向呈两洼一隆一斜坡的地质结构,而近南北方向以黄河为界划分出地质特征不同的黄河北与黄河南两个单元。黄河南地区由西向东展布着北东向的3个二级构造带:南部中央隆起带、葛岗集-固阳洼陷带、兰聊断裂带。受北北东和

北东向两组断裂控制沿中央隆起带,由北向南展布着北北东-北东走向的6个局部构造即桥口、新霍、唐庄、徐集、马厂和三春集构造,已经发现了桥口、徐集、马厂和三春集4个大小不等的油气田,是黄河南地区增储上产的主阵地。葛岗集-固阳洼陷带由葛岗集生油次洼和固阳生油次洼组成,是黄河南地区主要油气供给区(图1)。

2 东濮凹陷古水动力场演化与油气运聚

目前,大多数石油地质工作者都认为沉积水在油气矿产形成中起着巨大的作用。因此,计算岩石压缩时沉积水挤出的体积(即压出水水头),系统研究水动力场的形成与演化,确定地下水的流动方向,具有非常重要的意义。压出水水头反映了压实作用对水动力能量的贡献^[12,17],可以用来反映离心流的方向和强度关于压出水水头的计算方法,之前发表的文章已经做了详细的介绍^[18],在此不再赘述。

结合东濮凹陷沉积埋藏史特征,本文模拟计算了沙四段、沙三段、沙一段、沙二段和东营组沉积期泥岩

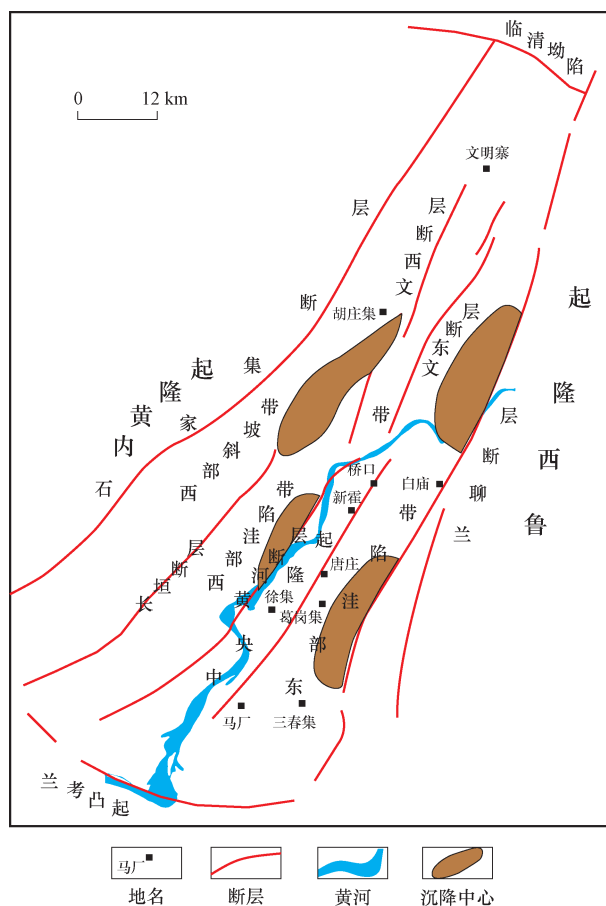


图1 渤海湾盆地东濮凹陷构造单元划分

Fig. 1 Tectonic unit division of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

表 1 东濮凹陷地层层序
Table 1 Sequence stratigraphic of the Dongpu Sag

地 层						厚度/m	岩性组合	沉积 旋回	沉积相
界	系	统	组	段	亚段				
新生界	第四系		平原组		Qp	150 ~ 230	浅棕黄色粘土、粉砂、砂砾层		
	新近系	上新统	明化镇组		Nm	100 ~ 1 250	棕色粘土、粉砂、含砾砂岩互层		河流相
		中新统	馆陶组		Ng	200 ~ 600	浅灰色砂砾岩夹棕、灰色泥岩		河流相
	古近系	渐新统	东营组		Ed	400 ~ 1 400	灰绿色泥岩与灰白色厚层砂岩互层	Ⅱ 旋 回	河流 – 泛滥 平原相
				沙一段	Es ¹ (上)	120 ~ 260	灰色泥岩夹薄层生物灰岩、砂岩组合		浅湖 – 半深 湖相、三角洲 相
					Es ¹ (下)	50 ~ 250	北部盐岩夹灰色泥岩及云质岩组合; 南部灰色泥岩、泥灰岩与粉砂岩组合		
			沙二段		Es ² (上)	250 ~ 550	紫红色泥岩、泥膏岩、盐岩与砂岩组合		滨浅湖相和 扇三角洲相
					Es ² (下)	250 ~ 650	红色泥岩与灰白色砂岩互层		河流 – 泛滥平 原、漫湖相
		始新统	沙河街组	沙三段	Es ³ (1)	150 ~ 500	暗色泥岩、油页岩与粉砂岩间互组合	Ⅰ 旋 回	半深湖 – 深水 盐湖相和三 角洲、浊积相 及扇三角洲相
					Es ³ (2)	130 ~ 500	北部盐岩与暗色泥岩组合; 南部灰色泥岩与薄层粉砂岩组合		
					Es ³ (3)	170 ~ 600	北部盐岩与暗色泥岩组合; 南部灰色泥岩与灰色砂岩间互		
					Es ³ (4)	500 ~ 2 000	北部灰白色盐岩与灰黑色泥岩组合; 南部灰色泥岩与砂岩互层		
				沙四段	Es ⁴	0 ~ 400	紫红色、灰色泥岩与砂岩互层		漫湖、浊积 相、河流相
	中生界				Mz				河流相

的压出水水头分布特征,可以用来反映盆地水动力场的演化特征即不同地史阶段离心流的发育特点和油气运移方向(图 2)。

东濮凹陷古近纪为裂陷发育阶段。沙四段沉积期沉积作用主要发育于兰聊断层下降盘。该期兰聊断层已开始较强烈活动。东濮凹陷发育多个沉降沉积中心,南区主要在徐集、三春集、方里集、长垣西南、南何家东北、东明北和固阳南等地有多个沉降 – 沉积中心,其中尤以徐集为中心的葛岗集凹陷最为发育。压出水水头以这些区域为中心呈不规则环状降低(图 2a),地层压实排出水形成的离心流呈不规则的放射状流动,离心流中心与压出水中心一致。

沙三段沉积期是东濮凹陷的主裂陷期和扩张期,充填的地层厚度可占古近纪地层厚度的 60% 以上。地层分布范围也迅速扩大。该期也是大多数断裂的主要活动期,大多数构造在该期基本定型。兰聊断层在该期的强烈活动对东濮凹陷的发展演化起到主要控制作用。葛岗集洼陷随兰聊断层南段沿走向生长向南北两侧扩大。沙三段沉积期虽然兰聊断层发挥了主导作用,西部长垣 – 石家集等边界断层的作用明显加强,尤其是石家集断层。同时出现了东部兰聊断层下降盘凹陷带和西部沿长垣 – 石家集 – 马寨 – 六塔 – 宋庙分布的西部凹陷带。该期干旱的气候为盐湖发育提供了基

础,在盆地中心发育盐层沉积。东濮凹陷南区存在 3 个明显的沉降中心(带),分别位于前梨园、葛岗集及南何家附近。由于沙三段沉积的巨厚泥岩,压出水水头显著增大,压出水水头呈现了继承性地以沉降中心为中心的不规则环状降低趋势(图 2b)。泥岩压实水离心流中心与沙四段沉积期基本一致。

沙二段沉积时期,盆地内部同沉积活动断层数量多、活动强烈,但是单条断层的位移量并不很大。沉积盆地表现为两条大致平行延伸的复式地堑,即西部凹陷带和东部凹陷带。盆地沉降中心由沙三段沉积时期紧邻主干边界断层转移到东、西两洼陷带的轴部。东濮凹陷南沉积沉降中心沿前梨园凹陷、葛岗集凹陷和孟岗集 – 南何家凹陷分布,马厂附近缺失。

沙一段沉积时期,大部分断层在沙二段沉积时期发育的断层基础上发生继承性活动,盆地沉降格局延续了沙二沉积期。这一时期的基底卷入正断层与其上盘的反向盖层滑脱正断层共同控制的地堑、半地堑断陷盆地,具有较明显的沉降中心转移,南区的西部次凹带沉积较东部次凹带厚。泥岩压出水仍以东、西两个次凹带为中心向周缘流动。沙一段 – 沙二段沉积期,泥岩压实水离心流由东、西两个次凹向周缘呈放射状流动,在凹陷夹持的中央低凸起形成汇合越流泄水区(图 2c)。马厂附近由于地层暴露剥蚀,发育大气水下渗向心流。

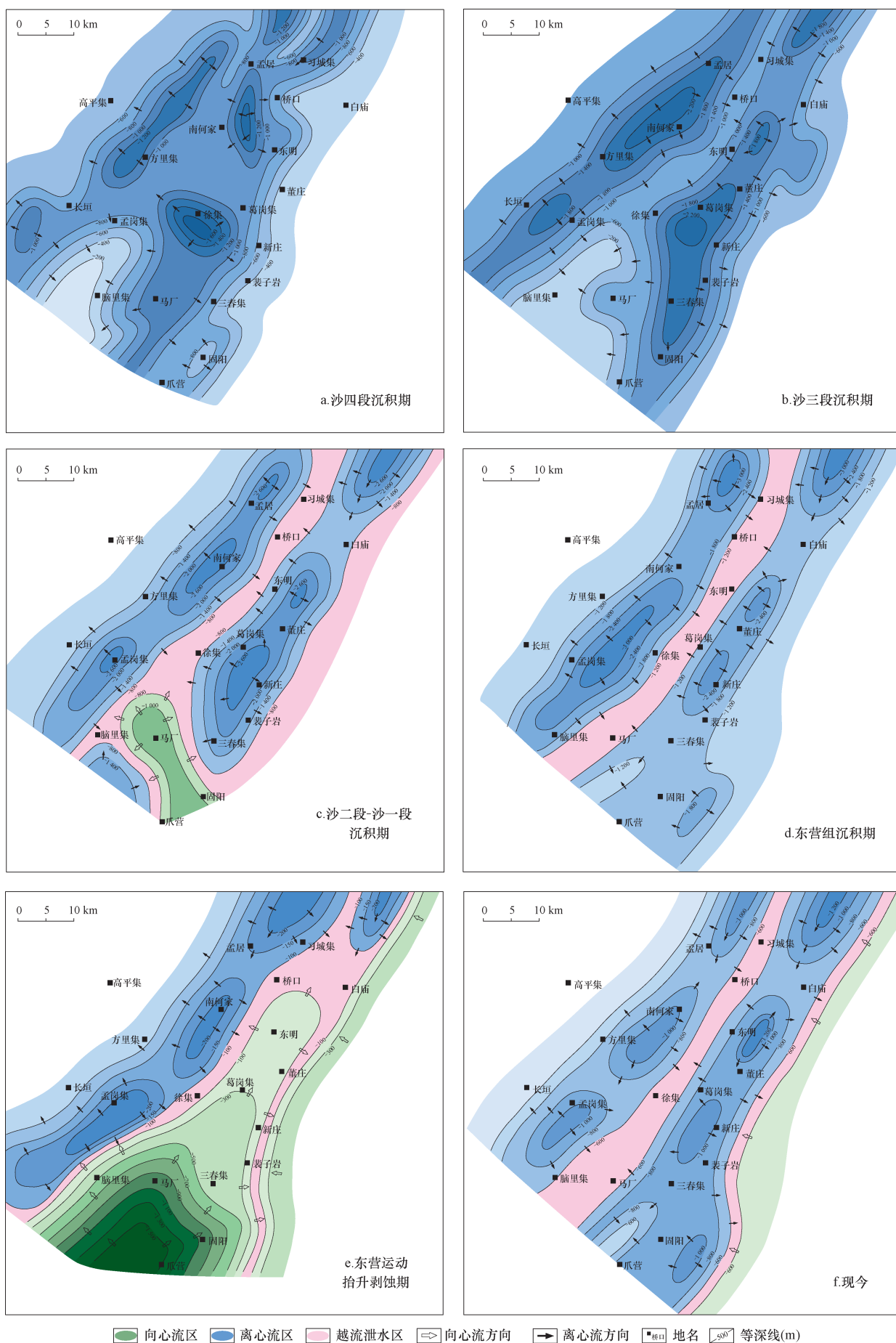


图2 东濮凹陷南部地下水水力场演化

Fig. 2 Evolution of the hydrodynamic field in the southern Dongpu Sag

东营组沉积期(图2d),盆地构造活动明显减弱。大部分基底断层在东营组沉积时期基本停止活动,但是兰聊断层中、北段和南区的黄河断层、长垣断层仍有一定程度的活动,成为这一时期控制盆地沉降的主要基底断层。东营组沉积时期盆地西北和东南局部开始抬升,导致这些地区早期沉积的沙街组地层遭受剥蚀。东濮凹陷东部次凹带在东南部分只有很薄的东营组地层沉积。

东营组沉积后,东濮凹陷发生了整体抬升,凹陷区大面积发生剥蚀,并形成了古近系与新近系之间的区域不整合面。东濮凹陷南区除西部次凹及前梨园凹陷中心发育弱的离心流,白庙和桥口以南发育大面积的大气水下渗向心流。离心流和向心流汇合形成越流泄水区(图2e,f)。

古水动力场研究表明,自沙二段沉积开始,黄河南地区由北向南西方向水动力减弱。东营运动抬升剥

蚀作用由北向南明显增强,进一步使得随后的沉积埋藏阶段,水动力场由北向南减弱,导致油层顶界由北往南变老。东濮凹陷属于压实流盆地,地下水的水势在盆地沉积中心最高,向盆地边缘降低,因此地下水运动的基本趋势是由沉降中心较深部位向盆地边缘和浅部做发散状离心流动。葛岗集-固阳洼陷沉降中心靠近兰聊断层,地层区域东倾,只有局部地区(白庙)地层西倾,因此,地下水由东向西运动占绝对优势。受这种水动力条件的控制,油气运移的总趋势是由洼陷中心向西侧中央隆起带运移。已发现的7个含油气构造中,有桥口、新霍、唐庄、徐集、马厂、三春集-爪营六个构造位于中央隆起带,白庙构造处于葛岗集洼陷东侧地层局部东抬的高部位,也是油气从洼陷深部向浅部运移的一个方向。

综上所述,东濮凹陷现今水动力场可划分为3个水动力单元(图3):东濮凹陷南部东、西次凹带发育泥

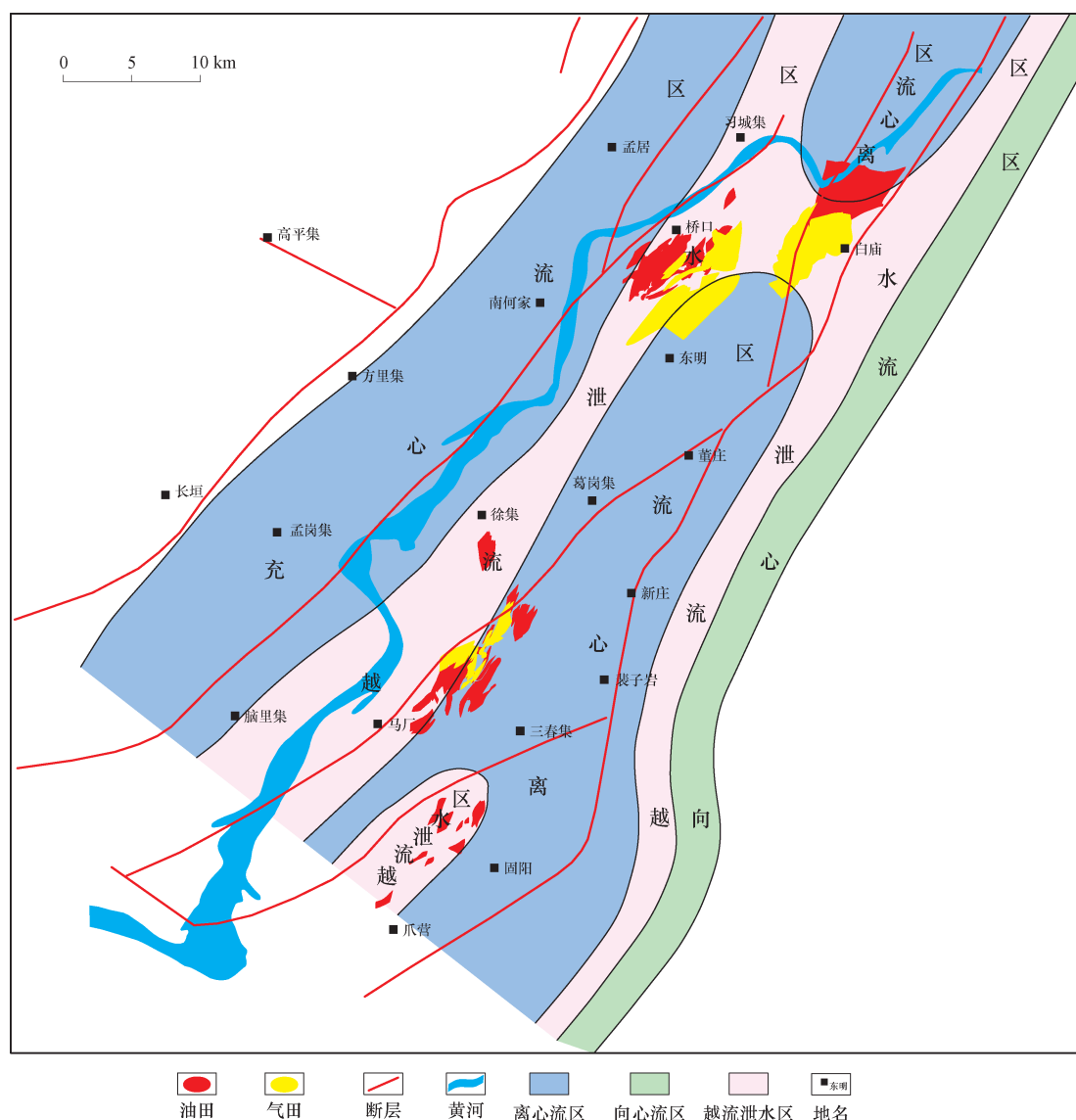


图3 东濮凹陷南部现今水动力单元平面分布

Fig. 3 Distribution of the present hydrodynamic units in the southern Dongpu Sag

岩压实水离心流;兰聊断裂带活动时间长,强度大,沟通深,地质历史时期遭受多次古大气水下渗影响,发育大气水下渗向心流;中央隆起带是继承性的越流泄水区,是油气聚集成藏的有利区域。

3 流体作用与断层封闭性

根据断层的开启性通常可将断裂分为开启性油源断裂和阶段性开启断裂。开启性油源断裂即在油藏主成藏期间,起流体运移通道作用的断裂;阶段性开启断裂则是指开启性较差,油藏主成藏期,泥岩压实,能量积累,流体动力比较强,突破了断层遮挡,此时断层即为开启性的通道断层,随着流体运移路径渐远,能量减弱,流体动力突破不了断层遮挡,此时,断裂扮演遮挡、封闭角色。开启性油源断裂为油气的主要充注通道,泥岩压实排出水沿开启性断裂快速上涌,越流浓缩程度低,其附近地层水矿化度相对较低,地层压力释放较快,能量降低方向上克服的阻力小,故水头、油势和气势值较高。桥口油藏主成藏期,桥东断裂、李屯断裂为主要的开启性油源断裂(图4),连通了深凹带的油源中心,是油气运移的主要通道,深部流体沿油源断裂快速上涌,越流浓缩程度小,地层水矿化度相对较低;一系列西倾的黄河断裂为阶段性开启断裂,且开启程度由东向西、由断层底部向顶部逐渐减弱,沿油源断裂运移来的地层流体运移至此能量减弱,突破不了断层的遮挡,在黄河断裂下盘逐渐聚集成藏。马厂地区马东断裂在油藏主成藏

期为主的开启性油源断裂(图5),马东断裂之间的一系列西倾断裂开启性也较好,与马东油源断裂一起为深部流体向构造高部位运移的主要通道;而马东断裂上盘的厂东等一系列西倾断裂多数为阶段性开启断裂,开启程度同样由东向西、由断层底部向顶部逐渐减弱,原油运移到此处逐渐聚集成藏,形成“刷子”状分布格局。

4 油气成藏期次及充注过程

4.1 油气成藏期次

前人已经应用储集层自生伊利石测年、饱和压力及流体包裹体均一温度等方法就桥口油田油气成藏期次做了很多的研究工作^[19-20],得出了比较统一的认识。普遍认为桥口地区具有多期油气充注的特点,且不同构造位置油气成藏期次差异较大。如桥口构造东翼李屯反向屋脊断块区发育3期油气成藏,分别对应早、中、晚3期,早期主要是石油成藏,对应时期为东营沉积期末;中期为油气混合成藏,以油为主,对应时期为东营运动抬升剥蚀期;晚期主要是天然气成藏,成藏时间为明化镇组沉积时期。构造南部、构造西翼及构造东翼地垒断块的沙二亚段-沙三段三亚段地层油气主要为两期成藏,分别对应早、中期,而构造顶部浅层的沙一段-沙二段仅发现一期油气成藏,对应时期为中期——东营运动抬升剥蚀期。说明东营运动抬升剥蚀期油气运移路径最远,晚期由于地层封闭性增大,二次生烃的天然气仅近距离成藏。

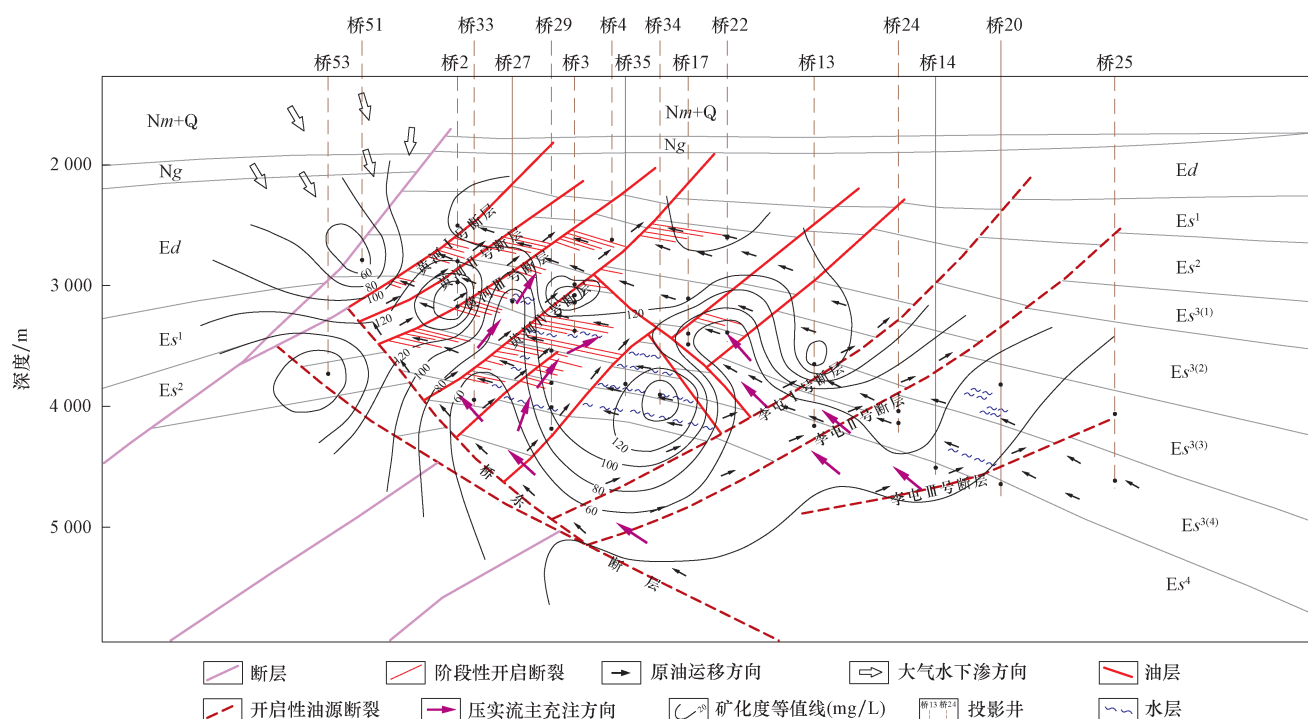


图4 东濮凹陷桥口油藏主成藏期流体动力特征与断层开启性示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the hydrodynamic characteristics and the fault opening in the primary pool-forming period of the Qiaokou oilfield, the Dongpu Sag

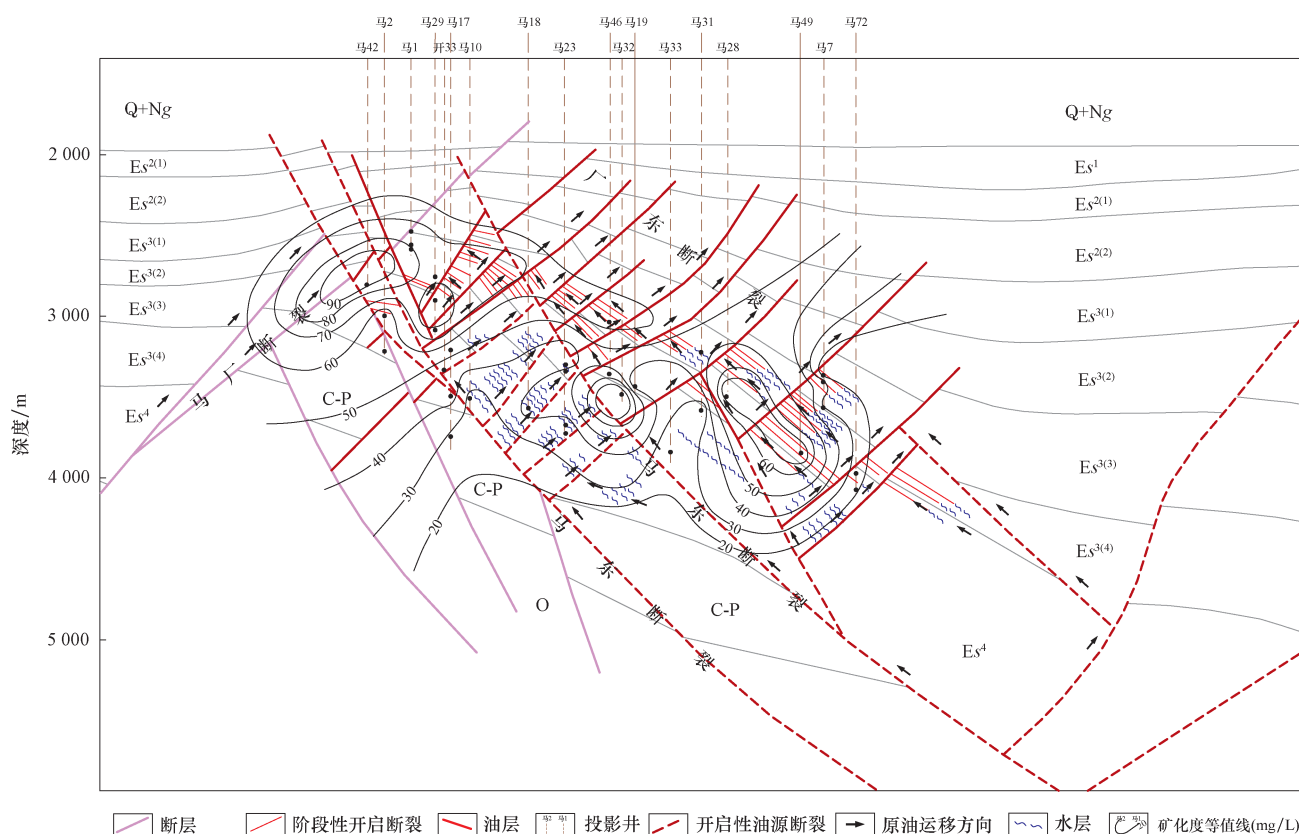


图5 东濮凹陷马厂油藏主成藏期流体动力特征与断层开启性示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the hydrodynamic characteristics and the fault opening in the primary pool-forming period of Machang oilfield, the Dongpu Sag

马厂油田普遍发育两期流体包裹体,代表了油气的两次充注过程。第一期油气包裹体均为液态烃包裹体,第两期为液态烃包裹体和气液烃包裹体混合,且第2期包裹体均一温度和盐度均普遍低于第1期流体包裹体(表2)。如马11-7井在2791 m的 $Es^{3(3)}$ 地层和3375 m的 Es^4 地层均发育两期流体包裹体,第一期发育在石英次生加大早期,主要为呈褐色及深褐色的液烃包裹体;第二期发育于石英次生加大期后,包裹体中的液烃呈淡黄色,显示较强的浅黄(白)色及浅黄绿色荧光,气烃呈灰色。 Es^3 地层中仅见少量的液烃、气液烃包裹体发育,而 Es^4 地层液烃包裹体约占30%,气液烃包裹体约占70%。马11-7井 $Es^{3(3)}$ 地层早期流体包裹体均一温度分布范围为107~123℃,均值为114℃,盐度分布范围为10.49%~15.17%,均值为11.78%(表2);中期流体包裹体均一温度均值为99℃,盐度为8.55%; Es^4 地层早期流体包裹体均一温度分布范围为106~139℃,均值为122℃,盐度分布范围为1.57%~16.15%,均值为9.54%;中期流体包裹体均一温度均值为102~126℃,均值为114℃,盐度分布范围为3.39%~4.18%,均值为3.58%(表2)。由上述数据可知,马11-7井 $Es^{3(3)}$ 和 Es^4 地层第二期流体包裹体均一温度和盐度均普遍低于第一期包裹体。

应用包裹体测温法判定油气藏形成时期的精度,

与埋藏史及热史恢复的精度直接相关^[21-22]。本文根据马厂地区11口井的储层流体包裹体均一温度数据,结合任战利等人(2002年)对东濮凹陷不同注陷各套烃源岩建立的热演化史及生烃史,判定马厂油田油气藏的形成时期(表2)。分析结果表明马厂地区具有两期油气充注的特点,对应的油气成藏时间为30~17 Ma,相当于东营组沉积末期至抬升剥蚀期。东濮凹陷东营运动抬升剥蚀厚度由南向北逐渐递减,马厂地区顶部剥蚀厚度较大,在1600~1700 m左右,与后期沉积厚度相当,导致晚期生烃能力弱,不利于晚期天然气成藏,仅在马厂构造翼部和深部地层有少量天然气生成。故马厂地区油气普遍为两期成藏,晚期天然气成藏较少。第二期流体包裹体捕获于东营运动抬升剥蚀期,当时地层抬升、断裂活动导致地层温度降低,同时由于古大气水下渗影响,地层流体的盐度也遭到淡化稀释。所以马厂地区第二期流体包裹体均一温度和盐度均普遍低于第一期流体包裹体。

4.2 油气充注

东濮凹陷南部地区主要烃源岩的生油窗深度约为2600 m,当埋深为3400~3500 m时达到生油高峰,干气阶段则需要埋深达到5000 m以上深度^[23]。沙一段沉积时期,石油开发早期运移、聚集。油气成藏规模较小,分布较零散(图6a)。东营组沉积时期(图6b),

表 2 东濮凹陷马厂油田流体包裹体均一温度和盐度分析结果

Table 2 Analysis of homogenization temperature of the fluid inclusions and salinity in Machang oilfield, the Dongpu Sag

井位	层位	埋深/m	成藏期次	均一温度/℃		盐度/%		充注时间	充注相态
				平均值	温度区间	平均值	盐度区间		
马 1	Es ³⁽²⁾	2 497	早期	95.75	90 ~ 108	4.23	0.53 ~ 14.46	Ed 沉积期末	油
			中期	92.50	87 ~ 98	0.71	0.71	Ed 剥蚀期	油气
马 10	Es ³⁽⁴⁾	2 703	早期	108.60	98 ~ 119	3.72	0.88 ~ 11.70	Ed 沉积期末	油
			中期	124.50	119 ~ 130	—	—	Ed 剥蚀期	油气
马 11-7	Es ³⁽³⁾	2 791	早期	114.40	107 ~ 123	11.78	10.49 ~ 15.17	Ed 沉积期末	油
			中期	99.00	99	8.55	8.55	Ed 剥蚀期	油气
马 11-7	Es ⁴	3 375	早期	121.80	106 ~ 139	9.54	1.57 ~ 16.15	Ed 沉积期末	油气
			中期	113.90	102 ~ 126	3.58	3.39 ~ 4.18	Ed 剥蚀期	油气
马 12	Es ³⁽⁴⁾	2 706	早期	108.70	106 ~ 115	4.44	2.57 ~ 5.56	Ed 沉积期末	油气
			中期	96.30	91 ~ 102	5.03	2.74 ~ 8.95	Ed 剥蚀期	油气
马 16	Es ³	2 665	早期	115.60	103 ~ 128	9.92	9.21 ~ 10.98	Ed 沉积期末	油
			中期	78.50	78 ~ 79	—	—	Ed 剥蚀期	油气
马 22	Es ³⁽⁴⁾	3 522	早期	122.80	118 ~ 130	6.08	0.88 ~ 10.86	Ed 沉积期末	油
			中期	94.00	94	3.71	3.71	Ed 剥蚀期	以气为主
马 26	Es ³⁽³⁾	3 224	早期	121.00	107 ~ 145	11.61	5.56 ~ 15.76	Ed 沉积期末	油
			中期	94.00	91 ~ 99	9.42	7.59 ~ 10.48	Ed 剥蚀期	以气为主
马 31	Es ³⁽⁴⁾	3 237	早期	107.30	95 ~ 121	7.48	1.57 ~ 16.05	Ed 沉积期末	油气
马 49	Es ⁴	3 704	早期	126.30	122 ~ 134	2.48	0.71 ~ 5.86	Ed 沉积期末	油
			中期	113.00	114 ~ 115	—	—	Ed 剥蚀期	油气
马古 5	Es ³⁽⁴⁾	3 070	早期	117.00	110 ~ 122	3.45	0.71 ~ 7.59	Ed 沉积期末	油

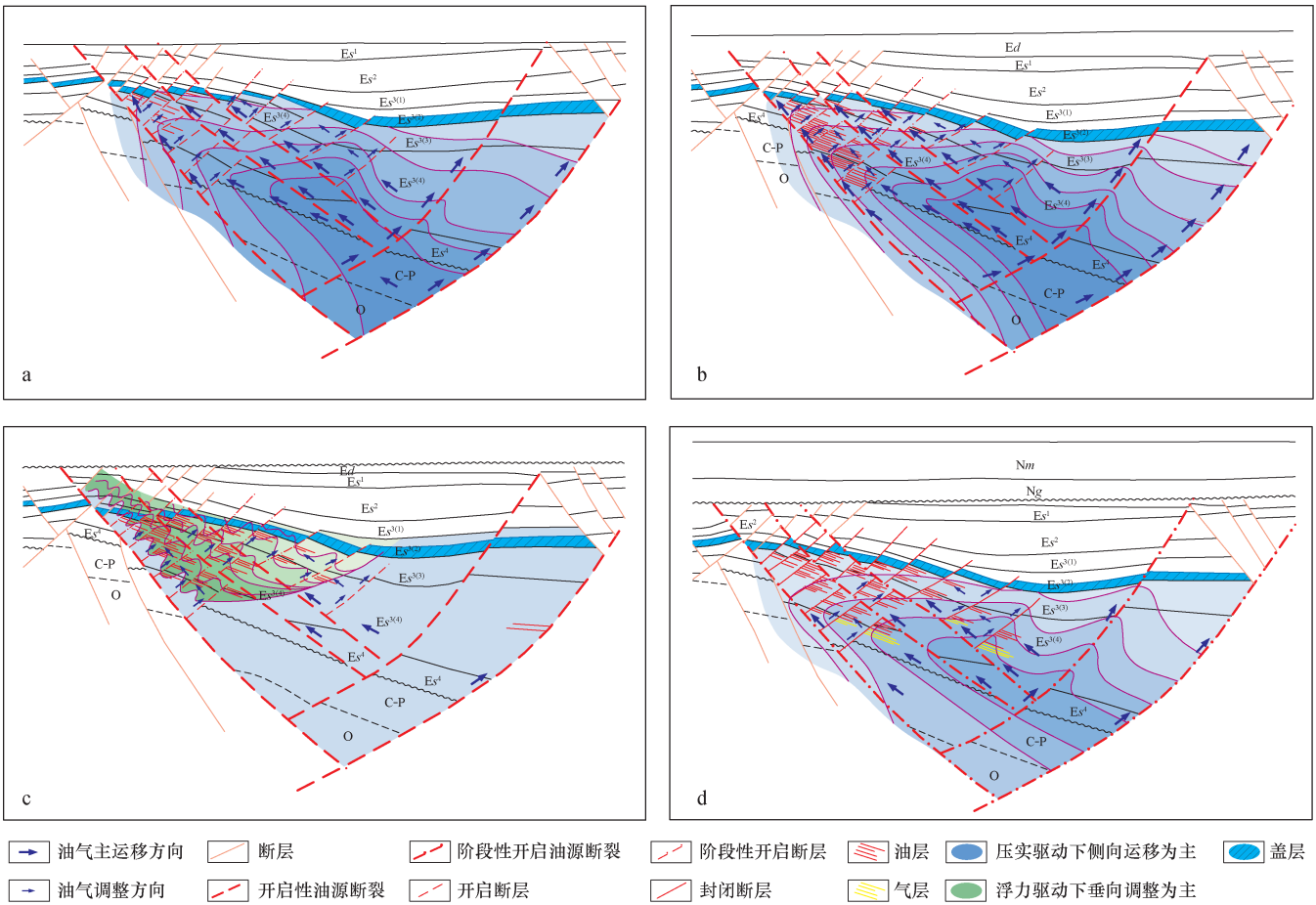


图 6 东濮凹陷马厂油田流体运移和油气成藏演化过程

Fig. 6 Evolution of fluid migration and hydrocarbon accumulation in Machang oilfield, the Dongpu Sag

a. 沙一段沉积期; b. 东营组沉积期; c. 东营组抬升剥蚀期; d. 明化镇组沉积末期

烃源岩达到生油高峰,地层沉积压实,泥岩压实流发育强度大,能量积累,是石油主要运移、聚集期。东营组沉积期,盆地构造活动明显减弱。大部分基底断层在东营组沉积时期基本停止活动,但兰聊断层中、北段和南区的黄河断层、长垣断层仍有一定程度的活动,成为这一时期控制盆地沉降的主要基底断层。桥东断层、李屯断层和马东断层分别是桥口和马厂地区油气运移的主要通道,来自深洼陷的油气在压实流驱动下,通过开启性油源断裂运移至构造高部位相对埋深较大的层位聚集成藏。油气以侧向运移为主,伴随着沿黄河断层、厂东断层等阶段性开启断裂向上垂向调整。由于阶段性开启断裂活动性相对较弱,石油垂向调整幅度较小,主要聚集在黄河断层及厂东断层下盘的底部。

东营组抬升剥蚀期(图6c),古近系烃源岩已进入生油高峰,生成的油气在向浅部地层运移的过程中,由于东营运动导致的地层抬升剥蚀、断层活动性增强,地层温度、压力降低,能量释放,天然气出溶游离,逐渐析出而形成一些天然气藏,但还是以形成油藏为主。能量降低,泥岩压实强度减弱,凹陷中心发育弱的离心流,流体侧向运移驱动力减小,油气主要依靠浮力沿断裂向浅部地层纵向调整为主,是石油运移、调整和主成藏期。东营组沉积末期的构造运动发育的次级断层,或后期油气驱替使早期深层油气藏重新分配在构造高部位的浅部重新聚集形成浅层次生油藏,油气分布范围变宽。这些次级断层活动时间较短,浅层油藏具有快速成藏的特征,由于浅层油藏为早期生成的油气成熟度低天然气含量少,加之东营运动地层剥蚀,盖层变差,天然气进一步散失,使得浅层油藏基本不含天然气,原油密度也较大。

馆陶组-明化镇组沉积期为天然气主成藏期(图6d),断层活动性减弱,封闭性增强,天然气通过油源断裂的沟通以垂向运移、侧向短距离调整聚集为主。发育于桥口构造东翼的李屯断层,定型时间较早,在东营组沉积早期就基本结束了断层活动,因此,其封堵性较好,阻止了葛岗集洼陷沙三段后期生成的油气继续向桥口构造顶部运移,只能在邻近断层的圈闭中聚集,所形成的油藏在后期由于埋深不断加大,地温逐渐升高而裂解为气态。在桥口构造东翼形成断层-地层复合圈闭的“李屯天然气藏”。北部含气区油气来自前梨园洼陷,沿一个个台阶向上运移,断层层层封堵,由于受玉皇庙断层的封堵作用,油气沿北侧聚集,在北翼深部位则聚集了晚期生成的凝析气。从而导致桥口地区的油气分布呈“上油下气、顶油边气”的分布格局。马厂地区晚期生烃强度和规模不大,仅少量天然气通过油源断裂的沟通垂向运移、侧向短距离调整聚集,分布在构造翼部相对较深的低部位(图6d)。

对比分析桥口和马厂油田油气成藏条件和充注过程可知,桥口地区油气充注范围更广,在 E_s^2 和 E_s^3 段地层均有油气成藏,构造翼部发育大量天然气藏,而马厂地区油气主要集中在 E_s^3 段地层,且后期天然气藏规模较小(图6)。分析原因主要有以下几点:

1) 与桥口地区相比,马厂油田 Ed 末抬升剥蚀厚度大, $Ng-Nm$ 期二次生烃强度弱,规模小,缺乏足够的动力推动流体运移至更远的地层成藏;

2) 断层活动性、组合结构差异。马厂地区并排发育3组倾角较小的马东断裂,与厂东断裂组合更加复杂,随离心流强度减弱,马东断裂上部封闭性增强,对下伏油层起遮挡作用;

3) 马厂油田油柱高度较低,浮力小,突破能力弱;

4) 马厂油田“0”号泥岩为区域性盖层,桥口油田以砂泥互层为主,缺乏稳定的区域性盖层,油气遮挡作用相对较弱。

5 结论

1) 东濮凹陷现今水动力场可划分为3个水动力单元:东濮凹陷南部东、西次凹带发育泥岩压实水离心流;兰聊断裂带发育大气水下渗向心流;中央低凸起位于东西两侧离心流汇合越流泄水区,油气伴随离心流在该带汇聚,是油气聚集成藏的有利区域。

2) 桥口地区具有多期油气充注的特点,且不同构造位置油气成藏期次差异较大。构造东翼李屯反向屋脊断块区发育3期油气成藏,分别对应东营沉积期末、东营运动抬升剥蚀期和明化镇组沉积时期。前两期以油为主,晚期主要是天然气成藏;构造南部、构造西翼及构造东翼地垒断块的沙三段二亚段-沙三段三亚段地层油气主要为早、中期两期成藏,而构造顶部浅层的沙一段-沙二段仅发现一期油气成藏,对应时期为东营运动抬升剥蚀期。马厂地区仅有两期油气充注,对应于东营组沉积末期和抬升剥蚀期,晚期天然气成藏较少。

3) Ed 沉积时期是石油最主要的生成、运移、聚集期,该阶段油气主要聚集在中央隆起带的深部地层; Ed 抬升剥蚀期是石油的主要调整运移期。早期形成的深层油气藏向构造高部位的顶部运移,重新聚集形成浅层次生油藏,油气分布范围变宽; $Ng-Nm$ 沉积期为天然气主成藏期,主要聚集在构造东翼的深部地层,形成深层天然气充注系统,从而导致油气分布呈“上油下气、顶油边气”的分布格局。

4) 桥口地区油气充注范围广,在 E_s^2 和 E_s^3 段地层均有油气成藏,构造翼部发育大量天然气藏,而马厂地区油气主要集中在 E_s^3 段地层,且后期天然气藏规

模较小。原因主要与马厂油田东营运动期间地层抬升剥蚀厚度大,馆陶组-明化镇组沉积期二次生烃强度弱,缺乏足够的动力推动流体运移至更远的地层成藏,且“0”号泥岩为区域性盖层,封闭能力强,马厂油田油柱高度较低,浮力小,突破能力弱等有关。

参 考 文 献

- [1] 雷利安. 东濮凹陷桥口构造油气运移模式探讨[J]. 天然气工业, 1996, 16(1): 9-14.
Lei Li'an. Oil and gas migration mode of Qiaokou structure in the Dongpu Sag[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(1): 9-14.
- [2] 王立志, 马维民, 向日忠, 等. 东濮凹陷复杂断块油气成藏规律与模式[J]. 断块油气田, 2002, 9(3): 15-18.
Wang Lizhi, Ma Weiming, Xiang Rizhong, et al. Law and model of reservoir-formation about complex fault-block in Dongpu Depression[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2002, 9(3): 15-18.
- [3] 董海彬, 王殿鳌, 许明旺. 东濮凹陷黄河南地区油气聚集规律研究[J]. 内蒙古石油化工, 2005, (10): 70-72.
Dong Haibin, Wang Dianao, Xu Mingwang. Study on oil accumulation rules of the south part of the Yellow River in the Dongpu Depression[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2005, (10): 70-72.
- [4] 汪蕴璞, 林锦璇, 汪林. 论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分[J]. 地球科学, 1995, 20(4): 393-398.
Wang Yunpu, Lin Jinxuan, Wang Lin. Division of water-bearing systems and hydrogeological periods of oil (gas)-bearing basin[J]. Earth Science, 1995, 20(4): 393-398.
- [5] Munn M J. Studies in the application of the anticlinal theory of oil and gas accumulation[J]. Economic Geology, 1909, 4: 141-157.
- [6] Rich J L. Moving underground water as a primary cause of the migration and accumulation of oil and gas[J]. Economic Geology, 1921, 16: 347-371.
- [7] Hubbert M K. The theory of ground-water motion[J]. Journal of Geology, 1940, 48: 785-944.
- [8] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37: 1954-2026.
- [9] 杨绪充. 东营凹陷古水文地质条件探讨[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1985, 3: 1-8.
Yang Xuchong. An approach to the paleo-hydrogeological condition of Dongying Depression[J]. Journal of the University of Petroleum, 1985, 3: 1-8.
- [10] Garven G. A hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits of the western Canada sedimentary basin[J]. American Journal of Science, 1989, 289(2): 105-166.
- [11] 程汝楠. 古水文地质及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 25-36.
Cheng Runan. Paleo-hydrogeology and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991, 25-36.
- [12] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991, 97-215.
Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principle of petroleum hydrogeology[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1991, 97-215.
- [13] Carr T R, Merriam, D F, Bartley J D. Use of related databases to evaluate regional petroleum accumulation, groundwater flow, and CO₂ sequestration in Kansas[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(12): 160-167.
- [14] 李梅, 金爱民, 楼章华, 等. 高邮凹陷真武地区地下水动力场与油气运聚[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(3): 582-588.
Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. Properties of hydrodynamic field and the migration and accumulation of oil and gas in Zhenwu area of Gaoyou Sag[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(3): 582-588.
- [15] Li Mei, Lou Zhanghua, Jin Aimin, et al. Origin flow of formation water and hydrocarbon accumulation in the Zhenwu area of the north Jiangsu Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 819-829.
- [16] 寿建峰. 东濮凹陷黄河南地区油气储层特征与形成条件[J]. 石油勘探与开发, 1991, 5: 84-91.
Shou Jianfeng. The characteristics of reservoir formations and its formation in the region south of the Yellow River, Dongpu Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 5: 84-91.
- [17] 查明. 压实盆地油气运移动力学模型与数值模拟: 以东营凹陷为例[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 86-90.
Zha Ming. The dynamic models and numerical simulation of secondary petroleum migration in compactional flow basins: an example from the Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 86-90.
- [18] 李梅, 金爱民, 楼章华, 等. 高邮凹陷古近纪水动力作用与油气运聚机理[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 3(41): 460-468.
Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. The hydrodynamics of Paleogene formation and mechanisms of hydrocarbon migration and accumulation in Gaoyou Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 3(41): 460-468.
- [19] 任战利, 崔军平, 冯建辉, 等. 东濮凹陷桥口地区油气藏形成期次研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 15-18.
Ren Zhanli, Cui Junping, Feng Jianhui, et al. Research on formation stages of hydrocarbon reservoirs in the Qiaokou area of Dongpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 15-18.
- [20] 刘世峰, 李自安, 吴世勇, 等. 东濮凹陷桥口断块群成藏期次研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(1): 167-170.
Liu Shifeng, Li Zi'an, Wu Shiyong, et al. Research on the hydrocarbon accumulation periods of the Qiaokou fault-blocks in the Dongpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 167-170.
- [21] 任战利, 张世焕. 中国北方沉积盆地热演化史与油气关系研究[J]. 地质学报, 1999, 20: 489-494.
Ren Zhanli, Zhang Shihuan. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in sedimentary basins of the north China[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 20: 489-494.
- [22] 任战利, 赵重远. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 1-4.
Ren Zhanli, Zhao Chongyuan. Recovery and comparison of geo-thermal gradient for late Mesozoic sedimentary basins in the northern part of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 1-4.
- [23] 冯建辉. 东濮凹陷杜桥白地区深层油气特征及成藏史研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
Feng Jianhui. Studies on the oil-gas character and the forming history of deep reservoirs in the Duqiaobai area, Dongpu Depression[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003.

(编辑 张玉银)