

苏北盆地高邮凹陷三垛一段 储盖组合定量分析及区带预测

丁建荣¹, 李储华², 马英俊²

(1. 中国石化江苏油田分公司 科技装备处, 江苏 扬州 225009;

2. 中国石化江苏油田分公司 勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 苏北盆地高邮凹陷三垛一段成藏条件较好且砂岩整体发育, 储盖组合条件是油气成藏的关键因素之一, 开展有效储盖组合分析及区带预测是评价三垛一段成藏条件和勘探有利区的重要工作。研究认为三垛一段内部发育多套储盖组合, 是控制各亚段油气成藏及富集程度的重要因素。首先, 根据泥岩盖层的稳定程度将储盖组合分为区域和局部2类; 其次, 在定性分析的基础上, 为了更准确地判别有效储盖组合, 解剖油藏进行定量分析, 利用含油亚段、上覆亚段砂地比与油气成藏的关系, 明确有效储盖组合的判别界限, 建立有效储盖组合的定量判别门槛界限值, 总结了3种有效储盖组合类型(下储上盖型、自储自盖型和混合储盖型); 在此基础上, 开展了有效储盖组合的区带预测, 优选出了有利区块, 指出黄珏东部—邵伯西地区是勘探构造、隐蔽圈闭的有利地区, 部署实施了构造、隐蔽圈闭的钻探均取得成功, 实现了三垛组勘探隐蔽油藏的首次突破。

关键词: 储盖组合; 定量分析; 区带预测; 三垛组一段; 高邮凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Quantitative analysis of reservoir-cap rock assemblages of the first member of Sanduo Formation and prediction of favorable regions in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

DING Jianrong¹, LI Chuhua², MA Yingjun²

(1. Science, Technology and Equipment Department, SINOPEC Jiangsu Oilfield, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Jiangsu Oilfield, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Overall, the reservoir forming conditions are good in the E_2s_1 (the first member of Sanduo Formation) of the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin. Sandstones were well developed. Reservoir-cap rock assemblage is one of the key factors controlling hydrocarbon accumulation. For the sake of evaluating reservoir-forming conditions and favorable exploration regions, it is important to analyze effective reservoir-cap rock assemblage and predict favorable regions. It was considered that there are multiple reservoir-cap rock assemblages, which are important factors controlling hydrocarbon accumulation and enrichment of each submember in the E_2s_1 . Firstly, according to the degree of mudstone stability, the paper qualitatively divided the reservoir-cap rock assemblage into two sorts: regional and local. Secondly, in order to recognize effective reservoir-cap rock assemblage more accurately and based on the qualitative analysis, a quantitative oil reservoir analysis was completed. Through analyzing the relationship between sandstone ratio of the hydrocarbon and upper submembers with hydrocarbon accumulation, the boundary between reservoir rock and cap rock was confirmed, a quantitative evaluation threshold was built, and three types of effective reservoir-cap rock assemblage were identified (lower reservoir and upper cap rock assemblage, interior reservoir and cap rock assemblage, and mixed reservoir and cap rock assemblage). Thirdly, based on the quantitative analysis, the favorable regions of effective reservoir-cap rock assemblage were predicted. Several regions have great exploration potential, such as the eastern Huangjue to western Shaobo area in the field of both structural and subtle traps, which have achieved good results in exploration.

Key words: reservoir-cap rock assemblages; quantitative analysis; prediction of favorable regions; first member of Sanduo Formation; Gaoyou Sag; North Jiangsu Basin

江苏油田高邮凹陷三垛组一段(E_2s_1)是苏北盆地 6 个主要含油层系之一^[1-4],截至 2015 年,已在高邮凹陷深凹地区(包括深凹带、南部断裂带和汉留断裂带)发现了 88 个 E_2s_1 油藏,累计探明储量占该凹陷总量的 10%(图 1a)。 E_2s_1 油气藏主要以构造圈闭为主,前人对 E_2s_1 成藏条件的分析主要关注圈闭落实状况、下伏阜四段(E_1f_4) 烃灶供给油源条件^[5-8]、圈闭断层封堵性能^[4,9-10] 以及宏观的储盖特征。随着老区勘探深化,一方面高邮深凹带 E_1f_4 烃灶向上覆同为断陷沉积体系的戴一段(E_2d_1)、戴二段(E_2d_2) 和 E_2s_1 供油源条件相似, E_2d_1 和 E_2d_2 隐蔽油藏丰富,探明储量占 E_2d 总量的 46.6%,而 E_2s_1 隐蔽油藏储量稀少,储量仅占 E_2s_1 总量的 4.9%,两者差异很大;另一方面,不同区块的 E_2s_1 含油层位不尽相同,断层封堵相似的不同断块圈闭含油性差异较大,甚至有的不含油。分析表明,这些与 E_2s_1 储盖组合特征细微变化有关,也与勘探思路有关。譬如, E_2d 隐蔽油藏储量主要是 2001 年以来有针对性勘探后取得的,而 E_2s_1 迄今都是按照构造圈闭勘探部署。因此,对 E_2s_1 储盖组合深入定量评价,既有助于高邮凹陷老区复杂断块成藏认识,又可推进 E_2s_1 隐蔽圈闭新领域的油气勘探。

1 垛一段成藏特征

1.1 构造特征

晚白垩世以来,高邮凹陷经历了多期构造运动,其中 E_2s 沉积时期处在高邮凹陷断陷演化阶段的中后期。该时期高邮凹陷总体上表现为近 NS 伸展变形,基本继承了 E_2d 沉积时期的构造面貌,

围绕深凹带的真武、汉留及吴堡断裂带的构造特征进一步发展,真②、汉留、吴堡等边界大断层及分支断层继续发育,这些断层在纵向上组成“Y”型、反“Y”型断层组合,是油气纵向沟通的主要通道;在平面上,控制形成多个高构造带,形成多个断鼻、断块圈闭群^[1-4,11-14]。分析认为, E_2s_1 圈闭是否成藏,不仅与断鼻、断块构造类型及油源特征有关,更与圈闭内部的储盖特征、断层遮挡性能密切相关。

1.2 油源特征

E_2s_1 油藏属于上含油系统,与下伏中含油系统 E_1f_2 烃灶、 E_1f_{2+1} 聚集的自生自储成藏组合的供源条件和油藏分布有很大不同^[15],也无法比拟渤海湾盆地沙河街组二段存在多源供给油气的情况^[16];高邮凹陷 E_2s_1 油源来自下伏 E_1f_4 烃灶, E_1f_4 烃源岩有机质丰度较高,其中有机碳含量平均为 1.53%,I 和 II 型干酪根类型,属于较好—好烃源岩。从有机质成熟度来看,高邮深凹带该套烃源岩埋深大,镜质体反射率 R_0 大于 0.6%,最大可达 1.3%,处于成熟生烃阶段^[5],深凹地区整体处在 E_1f_4 成熟烃源岩的生烃范围内,由其供烃的油藏已累计探明石油地质储量 1 亿多吨;从生排烃期与圈闭看,三垛组沉积晚期 E_1f_4 烃源岩进入大量生排烃阶段,生排烃时间与 E_2s_1 圈闭形成时间匹配较好。从烃灶供源看,真武、汉留及吴堡断裂控制深凹带 E_2s_1 沉积建造、低序次断层生长和局部构造形成, E_2s_1 油藏在纵向上远离下伏烃灶,属它源型成藏,深凹带断层发育,与砂体配置构成良好的油气垂向运移输导体系,纵向上沟通 E_1f_4 油气能力强^[6-8],只要 E_2s_1 圈闭坐落于 E_1f_4 成熟烃灶平面投影范围内^[4],遇到有

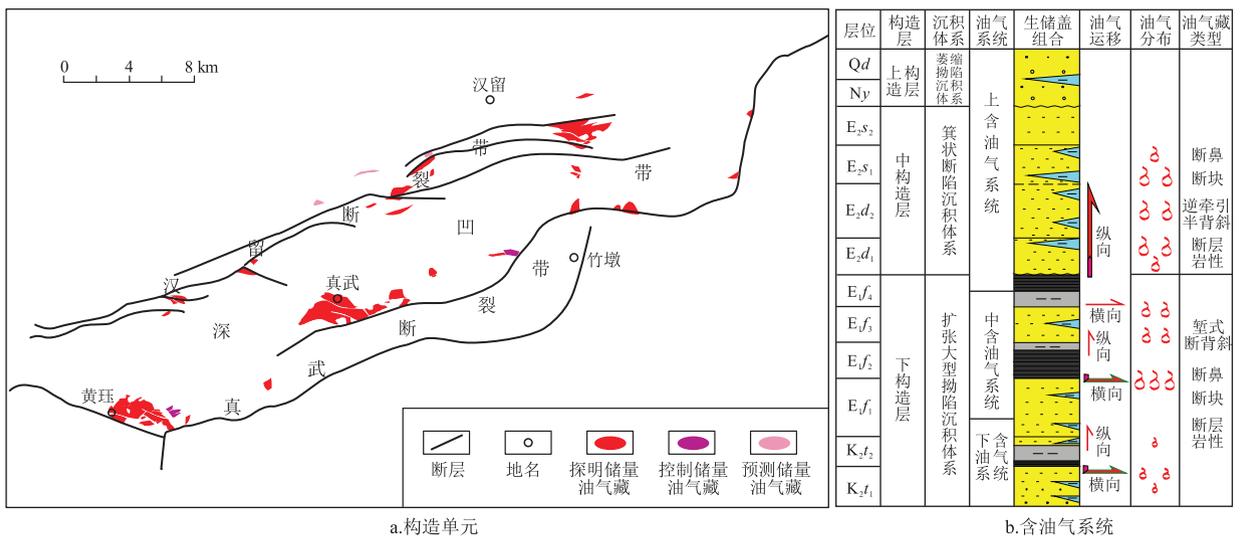


图 1 苏北盆地高邮凹陷构造单元划分及其含油气系统

Fig.1 Tectonic units and hydrocarbon systems in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

效圈闭即可聚集成藏,说明深凹带各处具有较均等油源供给条件(图1b)。

1.3 储盖特征

研究表明^[17-20],高邮凹陷 E_2s_1 沉积期物源供给充分,具有多物源、多沉积体系发育的特征。平面上,物源主要来自北、北东方向;发育浅水辫状河三角洲、扇三角洲、曲流河等沉积相^[21-26],包括辫状河三角洲前缘分支河道、河口坝,扇三角洲平原河道、前缘分支河道,曲流河河床、泛滥平原等微相类型,整体表现为砂岩发育,横向变化快速。纵向上,早期为湖泊—三角洲沉积体系,晚期逐渐演化为河流沉积体系,整体具有粗—细—较粗的沉积旋回特征。

高邮凹陷 E_2s_1 地层厚度较大,深凹带一般在 500~700 m 之间,斜坡带减薄为 200~400 m 左右,根据区域和局部标志层、沉积旋回和测井曲线等特征, E_2s_1 可分为 7 个亚段,自上而下分别为: $E_2s_1^1$ — $E_2s_1^7$ 。受沉积体系横向和纵向变化的影响,不同地区、不同亚段的砂泥岩发育程度存在较大差异,各亚段之间或亚段内部的砂泥岩互层形成了多套有利储盖组合。由于 E_2s_1 砂体整体发育,缺乏稳定分布的储盖组合,各地区、各亚段储盖组合分布不稳定,存在明显差异。

1.4 油藏特征

目前发现的 E_2s_1 油藏集中在深凹地区,分布在真武、汉留及吴堡断裂控制的局部构造高带上。按照圈闭成因, E_2s_1 油藏分为构造、断层—岩性复合圈闭 2 大类,可细分为 4 类:滚动小背斜油藏、断层油藏、岩浆岩刺穿油藏及断层—岩性复合油藏,断层油藏最多。受圈闭特征影响,不同地区油藏类型不同,油藏富集程度不同。从层系看,各亚段均发现油藏,但各亚段探明储量分布不均(表 1),主要分布在 $E_2s_1^4$ — $E_2s_1^7$,其中 $E_2s_1^6$ 储量最多,占 38.04%,其次为 $E_2s_1^7$ 、 $E_2s_1^5$ 及 $E_2s_1^4$,各亚段油藏富集程度存在明显差异。但对于同一地区来讲,圈闭类型往往是一致的,断层侧向封挡、油气输导等其他方面的成藏条件也基本一致。如真武油田是由逆牵引断背斜控制的 E_2d 、 E_2s_1 油藏,为苏北盆地最大的油田,油气不是赋存于三级构造整体断背斜,而是以三级构造为背景,聚集于被一系列断层切割形成的

四级断鼻、断块圈闭, E_2d 、 E_2s_1 均富集油气, E_2s_1 累计探明储量 962×10^4 t,占高邮凹陷本层位储量的 53%,断鼻、断块油藏为主,储量占其中的 77.5%;但是,各块、各层油气分布差异明显,主要集中在 $E_2s_1^6$ 、 $E_2s_1^7$ 、 $E_2s_1^5$ 等下部地层中,储量占其中的 88.1%。例如,真 11 块 $E_2s_1^6$ 为小断背斜,圈闭充满度仅 0.15,而相邻的真 12 块 $E_2s_1^6$ 为多断层夹持断块,含油面积达到 1.0 km^2 ,圈闭充满度为 1。因此,就 E_2s_1 含油层系而言,储盖组合是控制不同亚段油气富集差异的重要因素之一,深入其有效储盖组合研究对勘探工作十分必要。

2 有效储盖组合评价

2.1 储盖组合定性分析

由于 E_2s_1 砂岩整体比较发育,储盖组合条件是油气成藏的关键因素之一,按照泥岩盖层的稳定程度,将高邮凹陷 E_2s_1 储盖组合分为区域和局部 2 类。

(1) 区域储盖组合:在 $E_2s_1^6$ 沉积初期,高邮凹陷发生了一期全区范围的湖侵,沉积了一层厚 4~12 m 的灰黑色低电阻率泥岩。该套暗色泥岩厚度不大、覆盖范围广^[5],是良好的区域盖层,与下伏 $E_2s_1^7$ 砂组匹配形成有效的区域储盖组合。

(2) 局部储盖组合:其他亚段在不同地区存在着砂地比的低值区,这些低值区分布有一定的地区局限,可形成局部泥岩盖层,与下伏亚段的砂岩匹配能形成局部有效的储盖组合。各亚段局部泥岩盖层基本都有分布,但分布区域和范围差异较大。其中形成于湖泛期的 $E_2s_1^4$ 、 $E_2s_1^5$ 砂岩低值区覆盖范围较广^[5],与下伏亚段的砂岩储层形成分布较为广泛的局部储盖组合。

以黄珏油田为例,该地区除 $E_2s_1^1$ 外,其他亚段均有油气发现。统计表明(表 2),各单井不同亚段的砂地比自下而上有较大的波动, $E_2s_1^7$ 砂地比介于 0.05~0.14 之间,泥岩发育; $E_2s_1^6$ 砂地比介于 0.35~0.79 之间,储层较发育,在 $E_2s_1^6$ 底部发育厚度 8~10 m 的暗色低阻泥岩(图 2),是稳定的区域盖层; $E_2s_1^3$ — $E_2s_1^5$ 砂地比较接近,主要介于 0.14~0.28,泥岩相对发育; $E_2s_1^1$ 、 $E_2s_1^2$ 砂地比主要介于 0.03~0.07,泥岩很发育。

表 1 苏北盆地高邮凹陷 E_2s_1 各亚段探明石油储量分布比率
Table 1 Ratio of proven reserve of each submember to total proven reserve of E_2s_1 in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

亚段	$E_2s_1^1$	$E_2s_1^2$	$E_2s_1^3$	$E_2s_1^4$	$E_2s_1^5$	$E_2s_1^6$	$E_2s_1^7$
储量占比/%	1.21	1.87	2.75	8.25	20.82	38.04	27.06

表 2 苏北盆地高邮凹陷黄珏地区 E_2s_1 各亚段砂地比
Table 2 Sandstone ratio of each submember of E_2s_1 in Huangjue area of Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

井号	$E_2s_1^1$	$E_2s_1^2$	$E_2s_1^3$	$E_2s_1^4$	$E_2s_1^5$	$E_2s_1^6$	$E_2s_1^7$
黄 X88	0.03	0.05	0.18	0.25	0.18	0.79	0.14
黄 65	0	0.03	0.15	0.19	0.17	(0.75)	0.06
黄 3-3	0.04	0.06	0.14	0.16	0.14	0.35	0.05
黄 17-1	0.03	0.19	0.22	0.24	0.09	/	/
黄 80	0.05	0.07	0.22	0.28	0.13	0.68	0.12
黄 63	0	0.02	0.04	0.11	(0)	0.73	0.14
黄 X164	0	0.21	0.09	0.18	0.14	0.35	0.07

注：“()”表示有断层时剩余地层的砂地比，“/”表示地层断缺。

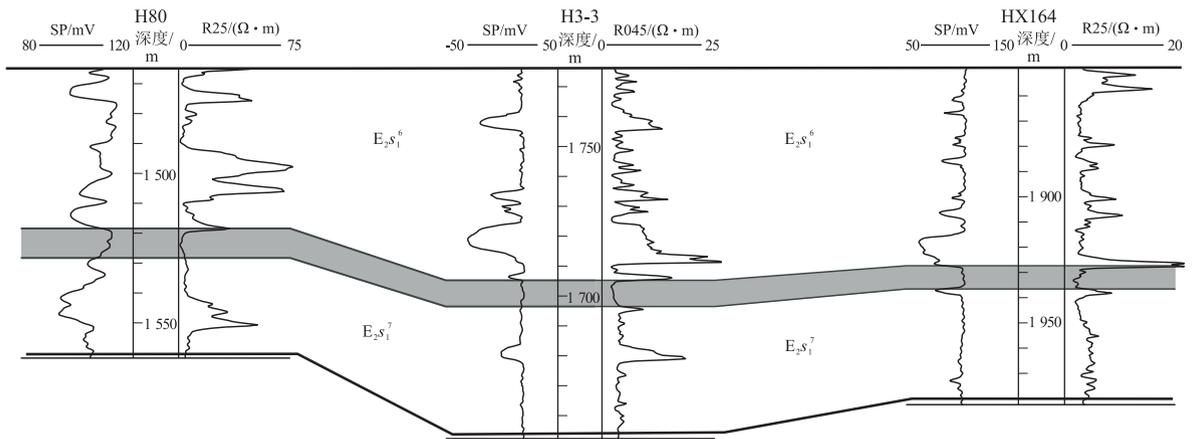


图 2 苏北盆地高邮凹陷黄珏地区 $E_2s_1^6$ 底部暗色泥岩连井对比

Fig.2 Well section of the bottom dark mudstone of $E_2s_1^6$ in Huangjue area of Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

一般来说,泥岩发育段作盖层,砂岩发育段作储层。从黄珏地区 E_2s_1 各亚段实钻砂地比来看, $E_2s_1^6$ 底部区域暗色泥岩为盖层与下伏 $E_2s_1^7$ 砂岩、 $E_2s_1^3$ — $E_2s_1^5$ 为盖层与 $E_2s_1^6$ 砂岩、 $E_2s_1^1$ 与下伏 $E_2s_1^2$ 砂岩均可构成有效的储盖组合。有效储盖组合的分布与黄珏地区发现的主要油藏相吻合。同时,在泥岩相对较发育的 $E_2s_1^3$ — $E_2s_1^5$ 内部和泥岩发育的 $E_2s_1^2$ 、 $E_2s_1^7$ 内部,仍然发现了油藏,表明从整个亚段看,作为盖层亚段的内部也具有储层条件,能够形成内部有效储盖组合。定性分析虽然可以了解高邮凹陷 E_2s_1 储盖组合的大致情况,但对于泥岩到底发育到什么程度能作为盖层,砂岩发育到什么程度能作为储层,什么情况下既能作为盖层又能作为储层,前人未做过定量研究。

为了更准确地判别有效储盖组合,结合区内 E_2s_1 油藏解剖,重点对储层、盖层条件及储盖组合匹配关系进行定量探讨,进而预测有效储盖组合分布,指导勘探工作。

2.2 储盖组合定量评价

有效储盖组合分析包括砂岩储层和泥岩盖层

2 个方面^[27-32],砂地比越大储集条件越好,砂地比越小盖层条件越好,对于整体砂岩发育的 E_2s_1 来说,泥岩盖层条件分析是关键。泥岩盖层封闭性分析应该包括封闭性和完整性 2 个主要方面^[27]。封闭性主要研究泥岩发育环境、成分组成、成岩演化等方面对封盖性能的影响;完整性主要通过储层孔隙流体超压、应力环境、岩石力学参数、地质力学特征等方面,探讨水压裂缝或断裂重新活动对盖层封盖完整性的影响。主要从宏观方面分析,认为能够封盖下伏地层形成油气藏,并具有一定范围的泥岩发育段就可作为有效盖层^[33-35]。

这里针对高邮凹陷深凹区已发现的 E_2s_1 油藏,深化砂地比统计规律分析,建立有效储盖组合的判别界限值,并进行有效储盖组合分布区的预测。

2.2.1 有效储盖组合砂地比门槛界限

高邮凹陷深凹区 $E_2s_1^1$ — $E_2s_1^7$ 已发现油藏 88 个,统计油藏各亚段含油性与上覆亚段的砂地比,绘制两者相关关系交会图(图 3)。其中横坐标为含油层所在亚段的砂地比,砂地比越大表示储集条件越好;纵坐标为含油层所在亚段的上覆亚段砂地比,

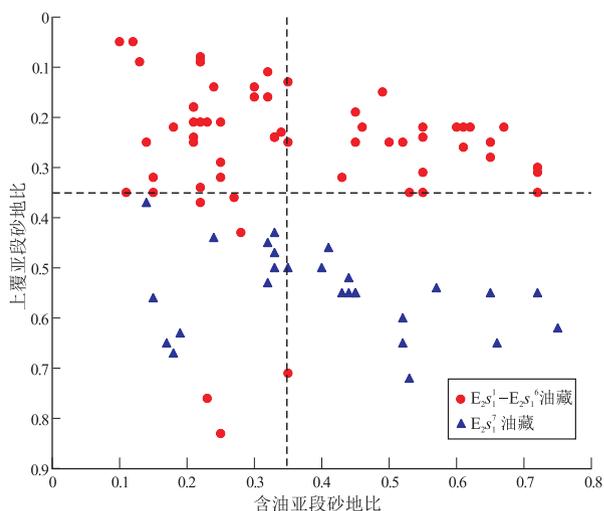


图3 苏北盆地高邮凹陷深凹地区
E₂s₁各含油亚段与上覆亚段砂地比交会图

Fig.3 Cross plots of the sandstone ratio between reservoir submember and upper submember of E₂s₁ in deep zone of Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

砂地比越小表示封盖能力越强。分析发现,局部储盖组合和区域储盖组合明显不同。

首先,考察 E₂s₁¹—E₂s₁⁶ 局部储盖组合门槛界限。高邮凹陷深凹地区 E₂s₁¹—E₂s₁⁶ 已发现油藏共 61 个(如图 3 所示的红点),各含油亚段的砂地比分布范围在 0.1~0.73,相应的上覆盖层亚段的砂地比绝大部分在 0.40 以内,仅 4 个点漏出;尤其当含油亚段的砂地比超过 0.35 时,上覆盖层亚段的砂地比全部小于 0.35,由此得出,上覆地层段作为有效盖层的合理门槛界限是砂地比小于 0.35。当上覆亚段的砂地比高于 0.35 时,只有储层砂地比低于 0.35 的亚段部分才能成藏,且油藏数量很少,而储层砂地比大于 0.35 的亚段,都没有聚集油气(图 3),反映当盖层砂地比大于 0.35 时,要求目的层段具有低的砂地比,即储层亚段砂地比小于 0.35,这样目的层内部有一定的自封盖能力,弥补盖层砂地比过高的不足,但成藏缺乏普遍性。譬如,富民油田富 18 油藏,该块富 18 井 E₂s₁³ 砂地比为 0.23,是含油层系之一,其上覆 E₂s₁² 砂地比为 0.76,大于盖层砂地比 0.35 的门槛值,不具备直接盖层的一般门槛条件;而 E₂s₁³ 依然成藏,反映目的层砂地比较低,即小于 0.35 储层门槛界限,内部可形成有效的储盖组合。由此可见,当储层段、盖层段的砂地比双双低于 0.35 时,储盖组合最佳,油藏最多;相反,双双超过 0.35 门槛界限时,这套储盖组合将失效不能成藏。

其次,考察区域储盖组合门槛界限。高邮凹陷

深凹带 E₂s₁⁷ 已发现油藏 27 个(图 3 中蓝色三角),由表 2 的 E₂s₁⁷ 和 E₂s₁⁶ 砂地比统计可知,E₂s₁⁷ 砂地比分布在 0.14~0.75 之间,其中砂地比介于 0.1~0.35 的油藏有 12 个,超过 0.35 的油藏 15 个,E₂s₁⁶ 整段砂地比主要分布在 0.35~0.7 之间,如前所述,若按照不稳定泥岩的砂泥岩段盖层对待,显然 E₂s₁⁶ 整段作为盖层的有效性不足;但是,E₂s₁⁶ 底部有一套厚度 8~15 m 左右、稳定分布的暗色低电阻率泥岩区域盖层,能够起到有效的封盖遮挡作用。可见,当存在稳定的区域盖层参与封盖时,无需考虑盖层段的砂泥比门槛,这也是单纯评价断层封堵难以发现和表述的。

据此得出,E₂s₁⁶ 底部暗色低阻泥岩分布稳定,是良好的区域盖层;而其他各亚段,当砂地比小于 0.35 时,可作为有效盖层;当砂地比大于 0.35 时,封盖能力变差,直至不能封盖。各亚段作为储层时,整个亚段砂地比从 0.10 到 0.79 均有油藏分布,值得关注的是当目的层砂地比介于 0.10~0.35 时,即使上覆地层砂地比大于 0.35、不能形成有效封盖,而储层段内相对发育泥岩,也可形成一定的自储自盖组合。

2.2.2 有效储盖组合类型

从储盖关系分析,高邮凹陷深凹地区 E₂s₁¹—E₂s₁⁶ 的有效储盖组合类型可分为 3 种:(1)下储上盖型,即储层段的砂地比大于 0.35、盖层段的砂地比小于 0.35 的组合,纯靠地层封盖;(2)自储自盖型,上覆层段的砂地比大于 0.35、目的层的砂地比介于 0.10~0.35,能成藏需要借助储层段自身较发育的泥岩封盖;(3)混合储盖型,当储层段的砂地比小于 0.35、盖层段的砂地比也小于 0.35 时,封盖油气成藏既可以是上覆砂泥岩段,也可能是目的层内部的泥岩部分,混合储盖型具有封盖双保险特点。

高邮凹陷 E₂s₁¹—E₂s₁⁶ 不同类型的局部储盖组合共 61 个油藏,总探明石油地质储量 1 326×10⁴ t,统计发现:(1)下储上盖型油藏数量较多,有 22 个,合计探明储量占总量的 54.5%。(2)混合储盖型控制的油藏数量最多,达到 33 个,合计探明储量占总量的 40.5%;其油藏数量明显多于下储上盖型的油藏数量,而储量却少于后者,这是因为上覆盖层条件相近情况下,储层砂地比低于后者,即盖层双保险了,却损失了一些储层效能。(3)自储自盖型控制的油藏个数最少,仅有 6 个,探明储量占总量的 5.0%。可见,E₂s₁¹—E₂s₁⁶ 下储上盖型、混合储盖型是 2 种最重要的类型。

同样地, $E_2s_1^7$ 砂岩储层— $E_2s_1^6$ 底部低阻泥岩区域储盖组合, 可分为下储上盖和混合储盖 2 种类型, 总共控制油藏个数 27 个, 合计探明储量 492×10^4 t。其中, $E_2s_1^7$ 砂地比超过 0.35 的有 15 个油藏, 属下储上盖区域储盖组合, 探明储量占该组合总量的 71.3%; 砂地比小于 0.35 的 $E_2s_1^7$ 油藏有 12 个, 可以归入混合储盖型, 探明储量占该组合总量的 28.7%, 这 2 种类型都是良好的有效储盖组合。

3 有效储盖组合预测及应用

3.1 有利区带预测

根据上述可知, $E_2s_1^6$ 底部低阻泥岩区域分布稳定, $E_2s_1^7$ 砂岩储层与其形成的下储上盖型组合, 在高邮凹陷全区为有效分布。

其他亚段的有效储盖组合预测, 以盖层有效性为评价关键因素, 提出相应的勘探部署思路。一是当区块某亚段砂地比大于 0.35 时, 主要考虑作为储层, 勘探目标为构造圈闭, 按下储上盖型的储盖组合, 重点分析上覆亚段的盖层有效性, 认为当砂地比小于 0.35 时, 上覆亚段才能形成有效的储盖组合。二是当某亚段砂地比低于 0.35 时, 可以同时考虑作为储层和盖层, 当作为储层时, 分析上覆亚段砂地比是否也小于 0.35, 若是, 则为混合型储盖组合, 勘探对象既靠构造圈闭目标, 也考虑隐蔽性的复合圈闭目标, 这是因为砂地比低于 0.3 为发育隐蔽圈闭的最有利剖面类型, 是勘探隐蔽油藏的最有利领域^[4,36]; 若大于 0.35, 则上覆亚段的封盖能力不足, 只能适用自储自盖型的储盖组合模式勘探。三是若某亚段砂地比小于 0.1 时, 则只考虑作盖层, 不考虑作目的层。

现以高邮凹陷深凹带油气发现较多的 $E_2s_1^6$ 为例, 分析储盖组合的有效性。 $E_2s_1^6$ 砂地比整体较高 (图 4a), 普遍大于 0.35, 最高超过 0.8, 各区块 $E_2s_1^6$ 只能作为储层, 因此 $E_2s_1^6$ 能否形成有效的储盖组合, 关键看上覆地层 $E_2s_1^5$ 的盖层有效性。 $E_2s_1^5$ 砂地比整体较低 (图 4b), 一般小于 0.35, 对下伏地层 $E_2s_1^6$ 起到良好封盖作用, 只有在东北部及西北部超过 0.35, 不能形成有效封盖。在砂地比小于 0.35 的地区, $E_2s_1^5$ 成为 $E_2s_1^6$ 良好的盖层, $E_2s_1^6$ 和 $E_2s_1^5$ 共同形成有效储盖组合, 以上储下盖型和混合型组合为主 (图 4c), 已发现的油气都处在有效储盖组合的范围内, 有效储盖组合分布的范围是勘探的有利地区。分析表明, 黄珏东—邵伯西地区 (图 4c 中蓝色矩形框) 是 $E_2s_1^6$ 与 $E_2s_1^5$ 形成有效储盖组合的地

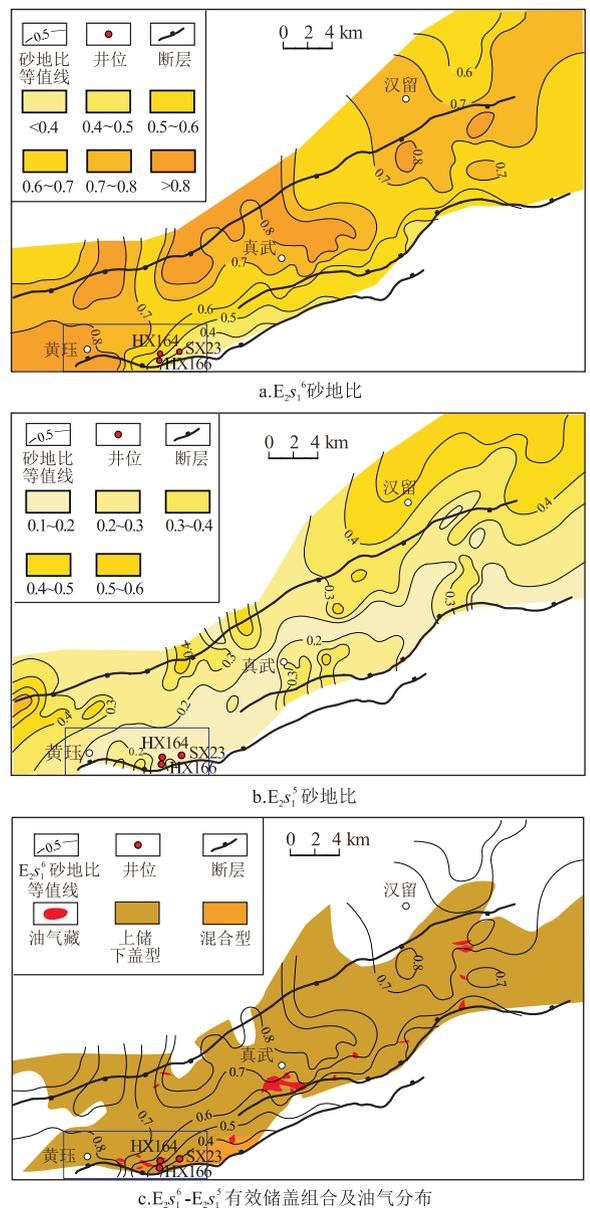


图 4 苏北盆地高邮凹陷深凹带 $E_2s_1^6$ 、 $E_2s_1^5$ 砂地比分布及有效储盖组合范围

Fig.4 Distribution of sandstone ratio and effective reservoir-cap rock assemblage of $E_2s_1^6$ and $E_2s_1^5$ in deep sag zone of Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

区之一, 其中 $E_2s_1^6$ 砂地比介于 0.3~0.8 之间, 砂岩较发育, 是良好的储层段, 同时砂地比变化较大。研究区东部砂地比小于 0.35, 是 $E_2s_1^6$ 唯一可形成混合型储盖组合的地区; 而该区 $E_2s_1^5$ 砂地比介于 0.1~0.3, 泥岩较发育, 是良好的盖层段, 能够对下伏 $E_2s_1^6$ 起有效的封盖作用, 即该区 $E_2s_1^6$ 与 $E_2s_1^5$ 形成下储上盖型和混合型储盖组合, 成为重要的勘探领域之一。

同样地, 对于其他局部储盖组合, 利用相同方法对各亚段也进行储盖组合评价。根据预测的砂地比平面展布来看, $E_2s_1^1$ — $E_2s_1^3$ 内的局部储盖组合

分布相对局限,主要在深凹带东南部地区,且以自储自盖、混合型储盖组合为主; $E_2s_1^4$ — $E_2s_1^6$ 内的局部储盖组合分布范围广泛,基本涵盖了高邮凹陷深凹带,以混合型和下储上盖型组合为主,具有较好的成藏条件。

因此,高邮深凹带东南部领域包括 $E_2s_1^7$ 在内,是各亚段有效储盖组合的有利分布区;其中,黄珏东部地区除了 $E_2s_1^1$ 全区和 $E_2s_1^2$ 西部砂地比低于 0.1, 只作盖层外,其他各亚段上、下匹配可构成多套储盖组合,以混合储盖型和下储上盖型为主,储盖组合有利。该区 E_2s_1 勘探程度较低,是勘探发展的地区之一。

3.2 勘探应用

通过有效储盖组合分布预测,认为黄珏东部—邵伯地区 E_2s_1 从上到下形成多套有效储盖组合,是勘探拓展的有利区之一。

在此基础上,开展地质评价、构造解释及地震属性预测等工作。黄珏东部—邵伯西地区位于高邮凹陷深凹带东南部,面向邵伯 E_1f_4 成熟生油次凹,油源条件优越;构造上,处于黄珏滚动断背斜的东侧翼部和邵伯油田的西翼,地层产状总体北倾、南拾,被一组近东西走向、一组近南北走向断层切割,形成一系列断块圈闭,临次凹地区断层较少,储层、盖层的砂地比皆小于 0.35, 具有形成断层—岩性圈闭的良好前景,有望接替黄珏、邵伯油田丰富的 E_2d 隐蔽油藏;同时,开展了多个亚段的地震振幅等属性预测工作。图 5a 展示了黄珏—邵伯地区 $E_2s_1^6$ 地震振幅属性预测图,图中形成了 3 个相对独立的振幅较强的红色区域,中间区域为黄珏东部地区,图中反映该地区 $E_2s_1^6$ 砂岩发育程度较高,是有利的储层段;图 5b 展示了黄珏—邵伯地区 $E_2s_1^5$ 地震振幅属性预测图,图中虽然还是 3 个相对独立区域,但振幅明显较弱,以蓝色为主,中间区域黄珏东

部地区 $E_2s_1^5$ 砂岩发育程度相对较低,能够作为有效盖层,与 $E_2s_1^6$ 形成有效储盖组合,具备勘探构造和隐蔽 2 类圈闭目标。

据此,通过构造精细解释、储层预测等工作,先后提交部署黄 X164, 黄 X166 和邵 X23 三口勘探评价井。其中,按照断块构造部署实施了黄 X164 井,在 $E_2s_1^2$, $E_2s_1^4$ 和 $E_2s_1^6$ 亚段见良好的油气显示,获得油层 9 层 30.1 m, 成为近年来该区 E_2s_1 发现油层最厚的 1 口井,已试获高产工业油流。按照隐蔽圈闭部署钻探了黄 X166 和邵 X23 井,在 E_2s_1 均见良好的油气显示,解释了多个油层待试油。部署的 3 口井与预测的有效储盖组合一致,特别是 E_2s_1 隐蔽油藏,是苏北盆地首次按照隐蔽圈闭部署实施,并取得了成功。总之,通过有效储盖组合定量分析和区带优选,打破了 E_2s_1 沉寂多年的勘探局面,取得了很好的勘探效果。

4 结论

(1) 高邮凹陷 E_2s_1 内部细分多套不同的储盖组合,是各区块控制油气成藏及各亚段富集程度差异的重要因素。

(2) 利用含油亚段、上覆亚段砂地比与油藏关系,建立储盖组合的定量判别门槛界限值,并总结出 3 种储盖组合类型。就 $E_2s_1^1$ — $E_2s_1^6$ 局部储盖组合而言,当地层砂地比大于 0.1 时可作储层,当地层砂地比小于 0.35 时可作盖层,配置合理时,形成有效储盖组合,按储层及盖层砂地比定量关系分为 3 种类型:下储上盖型(储层砂地比大于 0.35、盖层砂地比小于 0.35)、混合储盖型(储层砂地比介于 0.10~0.35、盖层砂地比小于 0.35)、自储自盖型(储层砂地比介于 0.10~0.35、盖层砂地比大于 0.35),下储上盖型、混合储盖型勘探最有利。就 $E_2s_1^7$ 储层— $E_2s_1^6$ 底部区域泥岩盖层组合而言, $E_2s_1^6$

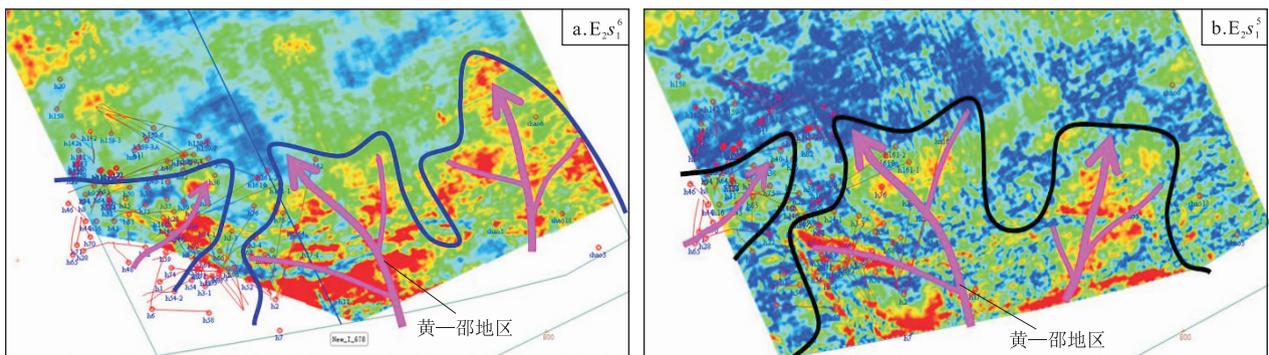


图5 苏北盆地黄珏—邵伯地区 $E_2s_1^6$ 、 $E_2s_1^5$ 地震振幅属性预测

Fig.5 Seismic amplitude attribute prediction of $E_2s_1^6$ and $E_2s_1^5$ in Huangjue-Shaobo area, North Jiangsu Basin

底部泥岩厚度不大,但分布稳定,是良好的盖层,可有效控制形成区域储盖组合,又根据其砂地比,分为下储上盖和混合储盖 2 种类型。

(3) 根据各亚段的有效储盖组合特点,优选出局部、区域储盖组合的有利区块;结合储盖组合预测,在黄珏东部—邵伯西地区优选出 3 个目标,分别按照构造、隐蔽圈闭实施钻探,均取得成功,特别是首次在 E_2s_1 成功勘探隐蔽油藏,为下一步老区拓展勘探提供了方向和方法。

参考文献:

- [1] 毛凤鸣,戴靖.复杂小断块石油勘探开发技术[M].北京:中国石化出版社,2005.
MAO Fengming, DAI Jing. The technologies of petroleum exploration & development in small complex fault blocks [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [2] 朱夏,徐旺.中国中生代沉积盆地[M].北京:石油工业出版社,1990.
ZHU Xia, XU Wang. The Meso-Cenozoic sedimentary basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [3] 刘玉瑞,王建.苏北盆地复杂断块油气藏勘探及技术[J].江苏地质,2003,27(4):193-198.
LIU Yurui, WANG Jian. Exploration and technology of complex fault block reservoir [J]. Jiangsu Geology, 2003, 27(4): 193-198.
- [4] 刘玉瑞.苏北后生—同生断陷盆地油气成藏规律研究[J].石油实验地质,2016,38(6):721-731.
LIU Yurui. Petroleum accumulation rules in hystrogenetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 721-731.
- [5] 姜生玲,聂海宽,荆铁亚,等.高邮凹陷阜宁组烃源岩特征及油源对比[J].特种油气藏,2014,21(2):66-69.
JIANG Shengling, NIE Haikuan, JING Tiewa, et al. Characteristics and oil source comparison of the Funing Formation hydrocarbon source rock in the Gaoyou Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 66-69.
- [6] 张照录,王华,杨红,等.含油气盆地的输导体系研究[J].石油与天然气地质,2000,21(2):133-135.
ZHANG Zhaolu, WANG Hua, YANG Hong, et al. Study on passage system of petroliferous basins [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 133-135.
- [7] 李月,胥凯,颜世永,等.含油气盆地油气输导体系分析[J].油气地质与采收率,2015,22(1):32-36.
LI Yue, XU Kai, YAN Shiyong, et al. Study on hydrocarbon carrier system in petroliferous basins [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 32-36.
- [8] 张卫海,查明,曲江秀.油气输导体系的类型及配置关系[J].新疆石油地质,2003,24(2):118-120.
ZHANG Weihai, ZHA Ming, QU Jiangxiu. The type and configuration of petroleum transportation system [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(2): 118-120.
- [9] 李储华,刘启东,李勇,等.高邮凹陷“双因素互补法”断层封闭性研究及应用[J].复杂油气藏,2012,5(2):1-4.
LI Chuhua, LIU Qidong, LI Yong, et al. Research and application of fault sealing properties by the double-factor complementary method in Gaoyou Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(2): 1-4.
- [10] 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 Yurui. Quantitative evaluation of fault sealing mode and capacity in the Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5): 531-536.
- [11] 李亚辉.苏北盆地高邮凹陷构造转换带控油机制研究[J].石油实验地质,2006,28(2):109-112.
LI Yahui. Study of control mechanism of oil and gas by the transfer zone in the Gaoyou Sag of the North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 109-112.
- [12] 吴林,陈清华,刘寅,等.裂陷盆地伸展方位与构造作用及对构造样式的控制:以苏北盆地高邮凹陷南部断阶带为例[J].石油与天然气地质,2017,38(1):29-38.
WU Lin, CHEN Qinghua, LIU Yin, et al. Extension direction and tectonism in rift basins and their control on structural style: A case study on the south fault terrace in the Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 29-38.
- [13] 吴林,束宁凯,陈清华,等.高邮凹陷真武断裂构造演化特征[J].油气地质与采收率,2015,22(1):37-41,62.
WU Lin, SHU Ningkai, CHEN Qinghua, et al. Tectonic evolution of Zhenwu fault in Gaoyou sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 37-41, 62.
- [14] 邱旭明.苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征[J].石油与天然气地质,2003,24(4):371-374.
QIU Xuming. Classification of fault-block traps and characteristics of petroleum reservoiring in Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 371-374.
- [15] 马英俊.苏北盆地金湖凹陷阜二段砂岩物性影响因素分析[J].石油实验地质,2017,39(4):477-483.
MA Yingjun. Influencing factors of sandstone properties of the second member of Funing Formation in the Jinhu Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 477-483.
- [16] 张鹏,张金功,张亮,等.济阳拗陷渤南洼陷沙河街组二段多源供烃成藏模式[J].石油实验地质,2018,40(2):159-167.
ZHANG Peng, ZHANG Jingong, ZHANG Liang, et al. Reservoir-forming pattern with multiple sources in second member of Shahejie Formation, Bonan Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 159-167.
- [17] 马英俊,李储华,李维.高邮凹陷垛一段沉积演化特征[J].复杂油气藏,2017,10(2):1-6.
MA Yingjun, LI Chuhua, LI Wei. Characteristics of sedimentary evolution of E_2s_1 in Gaoyou Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(2): 1-6.
- [18] 董荣鑫.高邮凹陷戴南—三垛组古生物与沉积环境演变[J].同济大学学报,1999,27(3):366-370.
DONG Rongxin. Evolution of paleontology and sedimentary environment in Dainan-Sanduo formation of the Tertiary Gaoyou Depres-

- sion[J].Journal of Tongji University,1999,27(3):366-370.
- [19] 李阳,邱桂强,刘建民.沉积学研究对济阳断陷湖盆油气勘探开发的推动作用[J].沉积学报,2004,22(3):400-407.
LI Yang, QIU Guiqiang, LIU Jianmin. Promotion of sedimentology research on oil exploration and exploitation in Jiyang lacustrine rift-subsidence basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3):400-407.
- [20] 刘玉瑞.苏北盆地高邮凹陷戴南组物源—坡折控扇研究[J].石油实验地质,2016,38(1):23-31.
LIU Yurui. Sediment sources and slope belt controlling fan systems in the Dainan Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1):23-31.
- [21] 杨仁超,李进步,樊爱萍,等.陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J].沉积学报,2013,31(1):99-107.
YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping, et al. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1):99-107.
- [22] 赵红格,刘池洋.物源分析方法及研究进展[J].沉积学报,2003,21(3):409-415.
ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3):409-415.
- [23] 刘军钊,解习农,孟涛,等.沾化凹陷埕南北部陡坡带深层扇体控砂机理及储层评价[J].石油实验地质,2016,38(1):122-127.
LIU Jun, XIE Xinong, MENG Tao, et al. Mechanism of sand-control and quantitative evaluation of reservoir effectiveness in the northern steep slope of Chengnan area in the Zhanhua Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1):122-127.
- [24] 邹才能,赵文智,张兴阳,等.大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J].地质学报,2008,82(6):813-825.
ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, ZHANG Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6):813-825.
- [25] 赵伟,邱隆伟,姜在兴,等.断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式:以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例[J].地质学报,2011,85(6):1019-1027.
ZHAO Wei, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. Depositional evolution and model of shallow-water delta in the rifting lacustrine basins during the shrinking stage: a case study of the third member and second member of Paleogene Shahejie Formation in the Niuzhuang Subsag, Dongying Sag [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(6):1019-1027.
- [26] 刘磊,钟怡江,陈洪德,等.中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究[J].沉积学报,2015,33(6):1170-1181.
LIU Lei, ZHONG Yijiang, CHEN Hongde, et al. Contrastive research of fan deltas and braided river deltas in half-graben rift lake basin in East China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6):1170-1181.
- [27] 周雁,金之钧,朱东亚,等.油气盖层研究现状与认识进展[J].石油实验地质,2012,34(3):234-245.
ZHOU Yan, JIN Zhijun, ZHU Dongya, et al. Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3):234-245.
- [28] DOWNEY M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11):1752-1763.
- [29] 吕延防,付广,张发强,等.超压盖层封烃能力的定量研究[J].沉积学报,2000,18(3):465-468.
LÜ Yanfang, FU Guang, ZHANG Faqiang, et al. Quantitative study on sealing ability of ultra-pressure caprock [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3):465-468.
- [30] 袁玉松,范明,刘伟新,等.盖层封闭性研究中的几个问题[J].石油实验地质,2011,33(4):336-340.
YUAN Yusong, FAN Ming, LIU Weixin, et al. Several discussions of sealing capacity studies of caprock [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4):336-340.
- [31] 何光玉,张卫华.盖层研究现状及发展趋势[J].世界地质,1997,16(2):28-33.
HE Guangyu, ZHANG Weihua. Review on study and tendency of caprocks [J]. World Geology, 1997, 16(2):28-33.
- [32] 付晓飞,吴桐,吕延防,等.油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势[J].石油与天然气地质,2018,39(3):454-571.
FU Xiaofei, WU Tong, LYU Yanfang, et al. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3):454-571.
- [33] 范明,陈宏宇,俞凌杰,等.比表面积与突破压力联合确定泥岩盖层评价标准[J].石油实验地质,2011,33(1):87-90.
FAN Ming, CHEN Hongyu, YU Lingjie, et al. Evaluation standard of mudstone caprock combining specific surface area and breakthrough pressure [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1):87-90.
- [34] 俞凌杰,范明,刘伟新,等.盖层封闭机理研究[J].石油实验地质,2011,33(1):91-95.
YU Lingjie, FAN Ming, LIU Weixin, et al. Seal mechanism of cap rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1):91-95.
- [35] 李鹤永,坤田,邱旭明,等.油气优势运移通道形成“三要素”分析:以苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油田为例[J].石油实验地质,2016,38(5):577-583.
LI Heyong, TIAN Kun, QIU Xuming, et al. Three factors controlling petroleum migration pathways: a case study of XJZ oilfield in the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5):577-583.
- [36] 刘玉瑞.苏北盆地戴南组泥屑流扇沉积[J].石油与天然气地质,2017,38(3):419-429.
LIU Yurui. Mud debris flow fan deposits in Dainan Formation of the Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3):419-429.