

文章编号:0253-9985(2012)06-0811-17

鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩 大油田成藏模式

赵靖舟,白玉彬,曹青,耳闯

(西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065)

摘要:文中将致密油藏定义为储层致密、只有经过大型压裂改造等特殊措施才可以获得经济产量的烃源岩外油藏,其绝对渗透率约小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度约小于12%。以往普遍认为,致密油藏属于连续型油气聚集,为非常规油气之一类。研究表明,鄂尔多斯盆地伊陕斜坡三叠系延长组中、下组合主要为致密和近致密砂岩油藏,其成藏模式既非以往认为的典型的常规岩性油藏,又非典型的连续型非常规油藏,而是介于常规与非常规油藏或连续与不连续型油气聚集之间的一种过渡类型,文中称之为准连续型油藏或油气聚集。它主要具有以下成藏特征:①油藏大面积准连续分布,无明确边界;②大面积生烃,高强度充注;③储层物性差,非均质性强;④圈闭介于常规圈闭与无圈闭之间,为非常规圈闭;⑤油、水分异差,无明显边、底水;⑥油藏压力系统复杂,且多具负压异常;⑦油气运移聚集主要为非浮力驱动,近距离运移成藏;⑧油藏形成和分布主要受烃源和储层控制,构造影响小;⑨保存条件好,油藏变化小;⑩资源丰富,勘探开发潜力大。准连续型致密砂岩油藏成藏模式的提出,预示着这类油藏具有较大的勘探潜力,但传统的地质研究和勘探思路需要作出相应的调整。

关键词:准连续型油藏;致密油;成藏模式;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin

Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing and Er Chuang

(School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Tight oil reservoirs are low-permeability oil accumulations in non-source rock reservoirs that can produce economic flow only through massive fracturing or other special measures. Their absolute permeability is less than $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ and porosity less than 12%. Tight oil reservoirs are widely accepted as the continuous-type accumulations of unconventional hydrocarbons. Based on our studies on the Ordos Basin in China, we found that oil reservoirs in the lower and middle plays of the Triassic Yanchang Formation on the Yi-Shan slope are mostly tight or near-tight sand oil accumulations. Their oil accumulation patterns are neither the conventional lithologic accumulations nor the continuous unconventional accumulations, instead a transitional type that we refer to as the quasi-continuous accumulation. The quasi-continuous hydrocarbon accumulation can be defined as extensive accumulations in tight reservoirs with neither defined boundaries nor water legs and controlled by unconventional trapping mechanisms. Studies indicate that the quasi-continuous tight sand oil accumulations in the Ordos Basin have the following characteristics: (1) oil distribution is extensive geographically in quasi-continuous form without a defined boundary; (2) the hydrocarbon generation covers vast area and the charging is highly intensive; (3) the reservoirs have unfavorable physical properties and are highly heterogeneous; (4) traps are un-

收稿日期:2012-10-24。

第一作者简介:赵靖舟(1962—),男,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。

基金项目:国家大型油气田与煤层气开发项目(2011ZX05007-004)。

conventional that exist in the transition form between conventional shaped traps such as the structural and stratigraphic traps and the shapeless trap or no trap at all; (5) the oil-water contact is unclear and no obvious edge/bottom water present; (6) the formation pressure system is complex and underpressure is predominant; (7) the migration and accumulation of hydrocarbons are short-distanced and driven principally by non-buoyant forces; (8) the accumulation and distribution of oil pools are rarely controlled by local structures, but primarily by source rock and reservoir conditions; (9) the preservation conditions are excellent and reservoir variations are unobvious; and (10) the resource potential is significant. The quasi-continuous accumulation model indicated that the exploration potential of this kind of reservoirs is large, but the traditional thinking of geological studies and exploration must be adjusted accordingly to fully tap their potentials.

Key words: quasi-continuous accumulation, tight oil, accumulation pattern, Ordos Basin

1 低渗透致密油藏的概念及划分

目前,国内外对低渗透油藏的界定比较混乱,对致密油藏的讨论则很少。美国一般将渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏称为低渗透油藏或致密砂岩油藏,而将渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层视为好储层。前苏联则将低渗透油藏的渗透率上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在我国,李道品^[1]也将 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为低渗透层的渗透率上限,并将低渗透储层分为6类:一般低渗透层(I类),渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;特低渗透层(II类),渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;超低渗透层(III类),渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;致密层(IV类),渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;非常规致密层和超致密层(V类),渗透率分别为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 与 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.0001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;裂隙-孔隙层(VI类),渗透率变化大或小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。1998年颁布的中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》^[2]同样将低渗透层的渗透率上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并分别确定了含油碎屑岩储层与含气碎屑岩储层的孔隙度、渗透率评价分类标准。其中,低渗透含油碎屑岩储层分为低渗透储层(孔隙度 $15\% \sim 10\%$,渗透率 $50 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、特低渗透储层(孔隙度 $10\% \sim 5\%$,渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、超低渗透储层(孔隙度 $<5\%$,渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和非渗透储层(渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)四大类。低渗透含气碎屑岩储层分为低渗透储层(孔隙度 $15\% \sim 10\%$,渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和特低渗透储层(孔隙度 $<10\%$,渗透率 $<0.1 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$)两大类。赵靖舟等^[3]根据对鄂尔多斯盆地中生界油藏储层的研究,将低渗透砂岩储层分为4类,即:低渗透层(I类),渗透率 $50 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;特低渗透层(II类),渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;超低渗透层(III类),渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;致密层(IV类),渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

可见,我国目前流行的低渗透储层上限(渗透率 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)大多沿用了前苏联的低渗透储层界限。然而,随着石油开采技术的进步以及油气成藏理论的深化发展,原先被认为是低渗透的储层已成为常规储层。有鉴于此,最近胡文瑞^[4]提出了一个新的低渗透储层划分标准,将渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为一般低渗透储层,渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为特低渗透储层,渗透率在 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的储层称为超低渗透储层。

另一方面,就致密层而言,我国以往多将其理解为无法获得工业油气流的非储层或非有效厚度层,因而许多有关低渗透储层的分类要么不包括致密层,要么将其渗透率上限定得很低(大多认为其渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下)。而实际上,致密层在国外特别是美国则普遍被作为非常规储层对待并早已从中生产,而且美国政府为了鼓励对这类油气的勘探开发还制定了相应的税收优惠政策。到目前为止,致密层已在国际上被广泛作为一种非常规油气储层对待。之所以对致密层会产生不同的理解,是因为我国学者以往所称的致密层与国际上广泛接受的致密层概念并不相同。国外将致密层渗透率上限一般定为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但指的是地层或原地渗透率^[5-8],而且多指的是致密气层。Spencer^[6]还提出将原地渗透率在 $0.1 \times$

$10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的天然气储层称为近致密储层,原地渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的天然气储层则作为常规储层。而我国以往所说的致密层渗透率上限 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 则应指的是储层的地面绝对渗透率,这与地层渗透率存在显著差异。袁政文等^[9]和许化政^[10]通过实验研究认为,地层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密层相当于地面渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并将天然气储层也分为3类,即:致密层,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,相当于地层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;低渗透层,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,相当于美国依据地层渗透率划分的近致密层(渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);高渗透储层,渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,相当于美国依据地层渗透率划分的一般储层($K > 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。Byrnes^[11]的研究认为,常规测试的低渗透储层的空气渗透率可比其原地有效气体渗透率高出 $10 \sim 1\,000$ 倍。目前,国内外给致密气储层的界定普遍是地面绝对渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但也有将渗透率在 $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的同样视为致密气^[12]。

相对于致密气而言,致密油则直到最近才引起关注,对其概念的讨论还几乎是个空白。根据对国内外致密油储层的调研结果,结合对鄂尔多斯盆地致密油藏储层特征和成藏研究认识,文中将致密油藏定义为储层致密、只有经过大型压裂改造等特殊措施才可以获得经济产量的烃源岩外油藏,其绝对渗透率约小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度约小于 12%。致密油藏主要包括致密砂岩油藏和致密碳酸盐岩油藏两大类型。

这里之所以将致密油藏定义为“烃源岩外油藏”,是为了区别于烃源岩内形成的页岩油藏。另外,文中所给出的致密油藏储层的孔隙度和渗透率上限主要是基于对国内外大量有关油气藏储层调研的统计性结果(包括对鄂尔多斯盆地的研究,见下文),且只是一个大致的界限,并不具有绝对的意义,具体的界限取决于对致密油藏界定的出发点或着重考虑的因素所在(经济因素、开发因素抑或是地质因素)。

就低渗透油层与致密油层的关系而言,文中参考国内外对天然气储层的划分并结合对鄂尔多斯盆地低渗透-致密油藏的研究认识,认为应将二者区别开来,提出含油储层可按照渗透率分为三

大类:①常规油藏,渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;②低渗透油藏(或近致密油藏),渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;③致密油藏,渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 致密砂岩油藏在鄂尔多斯盆地的分布

按照致密油藏的定义,这类油藏在我国以鄂尔多斯盆地分布最广,发现的大油田最多,探明储量和产量也最多,如三叠系延长组长₆的安塞、靖安、吴起、志丹、延长油田和长₈的西峰油田等。

研究表明,鄂尔多斯盆地致密砂岩油藏主要分布于三叠系延长组。根据沉积储层特征及含油性特征,延长组自上而下可分为长₁—长₁₀共计 10 个油层组 3 个成藏组合,即上组合(长₁—长₃)、中组合(长₄₊₅—长₇)和下组合(长₈—长₁₀)(图 1)。其中,三叠系延长组中部和下部成藏组合(即长₄₊₅—长₁₀油层组)主要就是致密砂岩油藏,其次是近致密砂岩或低渗透砂岩油藏;而上组合长₁—长₃储层平均孔隙度一般大于 12%~14%,渗透率一般在 $2 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[13],总体属常规油藏为主。

在三叠系延长组中、下组合中,长₆油藏是最典型的致密砂岩油藏,探明储量也最大,是鄂尔多斯盆地的主力油层。根据对盆地东部长₆储层中 13 300 个孔隙度样品和 12 763 个渗透率样品的测试分析结果,孔隙度分布于 3.00%~22.01%,平均值和中值均为 9.16%,其中孔隙度小于 10%的样品占 65.8%,小于 12%的样品占 92.6%,即孔隙度主体分布于 12%以下;渗透率分布于 $0.100 \times 10^{-3} \sim 172.430 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $1.241 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值为 $0.648 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 68.1%,小于 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 82.4%,小于 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 88.4%(图 2)。由于鄂尔多斯盆地长₆油藏属于典型的准连续型油气聚集,因此文中将致密砂岩油藏的孔隙度和渗透率上限大致确定为 12%和 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

长₄₊₅和长₇油层也是较典型的致密砂岩油藏。如盆地东部发现的川口、延长、甘谷驿和子北的长₄₊₅油藏,其孔隙度平均值在 8.2%~10.3%,渗

地层				油层组	沉积相		旋回	岩性剖面	厚度/m	岩性描述	油气显示	成藏组合								
系	统	组	段		相	亚相														
侏罗系	中统	安定组			河	湖沼相		80~150	棕红色泥岩为主,上部夹杂色泥灰岩,下部夹粉砂、细砂岩	红井子、大水坑获工业油流	侏罗系成藏组合									
						干旱湖沼相		200~400	上部棕红色为主,下部渐变为蓝灰色、灰绿色泥岩与灰白色砂岩互层;向下砂岩增多,底部发育一套厚层块状含砾粗砂岩											
		直罗组	直 ₁	河流相																
										直 ₂										
										直 ₃										
		延安组	富县组	1	湖沼相							250~300	灰黑色泥岩与灰白色中-细砂岩夹煤层,下部砂岩多为厚层块状	宁夏、陇东地区为主要产油层						
				2									灰黑色泥岩与灰白色砂岩夹煤层,砂岩多为厚层块状,中-细粒,底部发育巨厚含砾粗砂岩	宁夏、陇东、吴旗、志丹地区为主要油层						
				3									河流相							
4																				
5																				
6																				
7	河流相																			
8																				
9																				
10	J ₁ f																			
J ₁ f																				
三叠系	上统	延长组		五段	长 ₁	河		0~150	灰黑色泥岩夹浅灰色细砂岩、粉砂岩及煤线	下寺湾油田产油层	三叠系上部组合									
									四段	长 ₂		120~160	深灰色泥岩与灰绿色粉-细砂岩互层,下部砂岩致密	安塞、靖安油田产油层之一						
															长 ₃	100~170	灰黑色泥岩夹少量薄层细粒砂岩	子北、川口油田主要产油层之一		
																			长 _{4,5}	70~100
									三段	长 ₆		180~200	深灰色泥岩夹少量粉-细粒砂岩	马家滩油田产油层	马家滩油田产油层					
																长 ₇	90~130			
																长 ₈				
									长 ₉											
									一段											
									长 ₁₀											

图1 鄂尔多斯盆地含油组合分布柱状图

Fig. 1 Stratigraphic distribution of oil plays in Ordos Basin

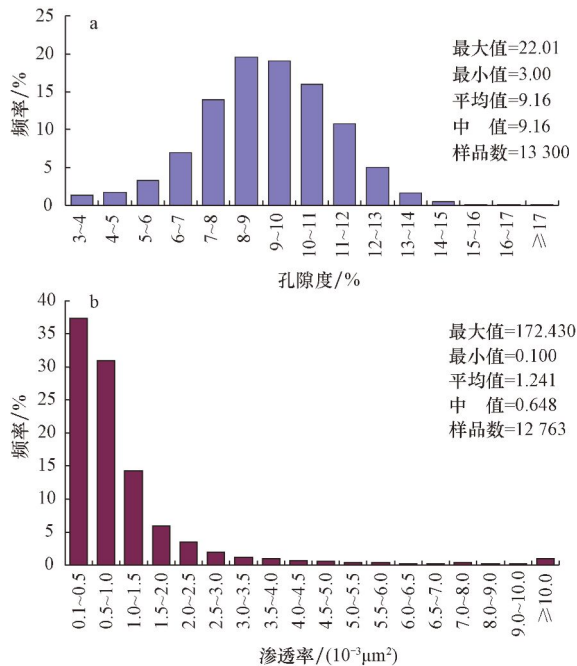
图2 鄂尔多斯盆地长₆砂岩物性分布直方图

Fig. 2 Histograms of porosity and permeability of Chang-6 sandstones in the Yanchang Formation of Ordos Basin

a. 孔隙度; b. 渗透率

透率平均值在 $0.90 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率中值在 $0.24 \times 10^{-3} \sim 0.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。长₇油层以志丹油田为例, 根据 152 个样品的分析结果, 其平均孔隙度为 8.8%, 平均渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

长₈和长₉油层中致密及近致密砂岩油藏也占有重要地位。如西峰油田长₈砂岩储层孔隙度一般为 5.4%~16.6%, 平均 9.9%; 渗透率主要集中在 $0.6 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [14]; 姬塬油田长₈油层组储层据 209 个样品的物性实测结果, 其平均孔隙度为 9.92%, 平均渗透率为 $1.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [15]; 宜川英旺油田长₈段储层根据 9 口井 394 块样品的物性分析结果, 孔隙度主要分布区间为 2.0%~17.0%, 平均值为 10.7%; 渗透率主要分布区间为 $0.15 \times 10^{-3} \sim 2.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [16]; 富县地区长₈油藏的孔隙度分布于 3.4%~17.7%, 平均 9.3%; 渗透率分布在 $0.013 \times 10^{-3} \sim 5.250 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.495 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [17]。另外, 近年来新发现的长₉油层可能也以致密砂岩储层为主。在古峰庄—元城地区, 长₉储层的孔隙度分布在 14.2%~9.76%, 渗透率为 $1.22 \times 10^{-3} \sim$

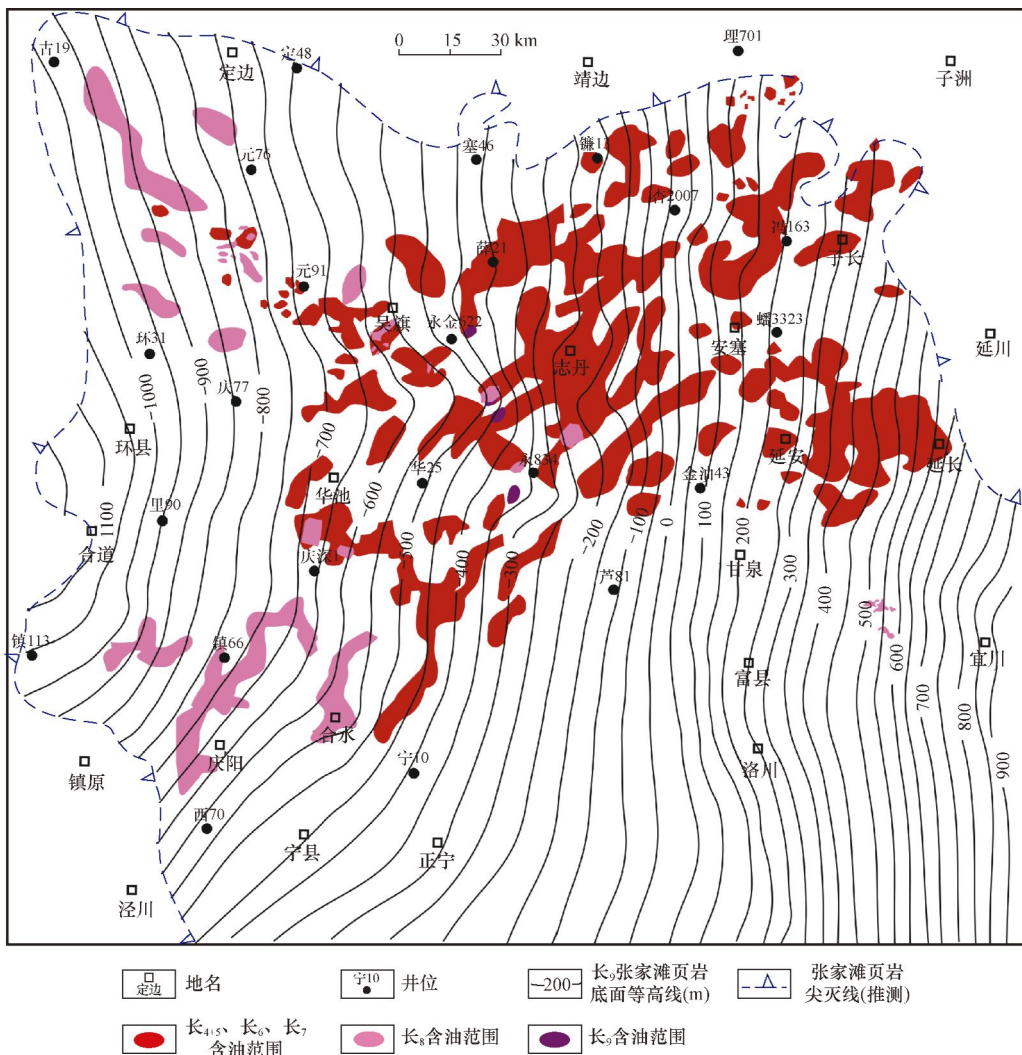


图3 鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密砂岩油藏分布

Fig 3 Distribution of tight sand oil reservoirs in the Triassic Yanchang Formation of Ordos Basin

$3.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在庆阳—长武地区, 孔隙度为 $3.20\% \sim 10.47\%$, 渗透率为 $0.09 \times 10^{-3} \sim 0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在高桥—洛川地区, 孔隙度分布在 $8.95\% \sim 10.15\%$, 渗透率为 $0.40 \times 10^{-3} \sim 2.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [18]。

平面上, 三叠系延长组致密油广泛分布于定边—靖边—子洲以南的盆地南部广大地区, 构造上主要分布于伊陕斜坡(图3), 以长₆致密油藏分布最广, 探明储量也最大, 是鄂尔多斯盆地原油生产最主要的产层; 其次是长₅油藏, 主要分布于盆地西南部。

3 对鄂尔多斯盆地大油田成藏模式的认识

对鄂尔多斯盆地致密砂岩(以往称特低渗透

或超低渗透砂岩)大油气田成藏模式的认识, 还存在分歧。主要存在3种认识: 一是岩性油气藏论; 二是多因素控藏论; 三是连续型油气聚集论。

3.1 岩性油气藏论

早在20世纪初, 美国人 M. L. Fuller 和 F. G. Clapp^[19]在对鄂尔多斯盆地(他们称之为“陕西盆地”或“陕北盆地”)进行石油地质勘查时, 就已经认识到该盆地中部为单斜构造, 但他们得出的结论是包括盆地腹部伊陕斜坡在内的整个鄂尔多斯盆地不可能有大量石油存在, 理由是“该盆地‘纵向上大部分的岩层厚度中砂岩太多, 盆地边缘地区褶皱又过于强烈且变质可能太深, 而盆地中部地区主要为单斜且倾斜如此平缓, 以致不容许有大

量油气聚集”。60—70年代,鄂尔多斯盆地的勘探家们基于盆地腹部构造简单、褶皱断裂不发育的特点,提出其油藏类型应以岩性油藏为主,并认为油藏的形成和分布主要受沉积相控制^[20-21]。80年代以来,他们明确认识到岩性油藏是鄂尔多斯盆地腹部三叠系油藏的主要类型^[22-24]。与此同时,对三叠系油藏的研究不断得到深入,除了越来越多的研究者强调岩性油藏在鄂尔多斯盆地三叠系油藏形成中的重要性外,还提出了三角洲控油理论或三角洲成藏理论,认为三叠系延长组三角洲沉积发育,对三叠系油藏的形成和分布起着重要控制作用^[13,20,25-38]。另外,80年代中期以来还提出了成岩圈闭的概念,认为成岩作用对三叠系延长组油藏形成具有重要控制作用^[27,39-40]。

然而,尽管岩性油气藏理论和沉积相对油气藏形成和分布控制的重要性已被许多研究者所接受,并广泛应用于指导鄂尔多斯盆地油气田的勘探开发,但勘探实践证明,无论是三叠系延长组还是上古生界,并不是所有砂体发育的地方都有油气分布,油气藏类型也并非完全传统意义上的岩性油气藏,说明控制鄂尔多斯盆地大油气田形成与分布的因素并不简单。

3.2 多因素控藏论

20世纪80年代,已有学者开始注意到鄂尔多斯盆地三叠系油藏的形成和分布并不仅仅受砂体沉积环境控制,而且还受烃源岩及其与储集层的配置关系控制^[26]。但直到20世纪末特别是21世纪以来,鄂尔多斯盆地三叠系油藏控油因素的复杂性才开始为越来越多的研究者所认识。张文昭^[41]强调指出,生烃凹陷和三角洲沉积等是控制三叠系油藏的主要因素。胡文瑞等^[32]指出,三叠系延长组不同油层由于控油因素的不同,油藏类型也存在差异,其中长₂油藏主要为三角洲平原沉积,油藏受岩性和构造双重控制,油藏类型为构造-岩性油藏;长₃-长₆油藏主要为三角洲前缘沉积,圈闭为岩性圈闭。王道富等^[34]则认为,长₆、长₄₊₅和长₃油藏主要存在于三角洲前缘河口坝及水下分流河道沉积砂体中,含油受岩性控制;长₂和长₁油藏主要分布在三角洲平原分流河道沉积砂体中,受岩性和构造双重控制,构造是油气相对富集的主要因素之一。何自新等^[37]强调,生排烃

中心、沉积相和局部构造等是三叠系油藏形成与富集的主要控制因素。杨华等^[13,42]指出,湖相烃源岩的大面积分布与大型复合三角洲储集体的发育是陕北地区大型三角洲油藏得以形成和富集的主要因素,强调长₂优质油源岩在低渗透油气成藏富集中起着主导作用^[43-44],进而提出延长组油藏分布遵循“源控论”和“相控论”,构造对油藏的控制作用不明显^[42]。赵靖舟等^[45]的研究认为,伊陕斜坡三叠系油藏的形成和分布受沉积相、鼻状隆起背景、运移通道及水动力等多重因素控制,且不同层系油藏形成和分布的主控因素既有相同之处又存在一定差异,油藏类型也既有岩性油藏又有构造-岩性等复合油藏,从而提出了多因素控藏、多类型成藏的认识;并强调长₂油藏与长₂油藏在富集高产控制因素方面的一个重要区别是,鼻状隆起构造对长₂油藏的控制作用更为明显^[45-47]。武富礼等^[48-49]在指出陕北地区三叠系油藏的形成受油源、储层、盖层和构造等多因素控制的同时,还进一步指出不同层位的油藏无论是在成藏条件还是在分布上存在补偿关系,受多因素补偿控制,三叠系油藏类型在纵向上呈现出有规律的序列变化特征,自下而上依次为岩性油藏、构造-岩性复合油藏及构造油藏。

可见,尽管不同研究者得出的控油因素认识并不完全相同,但其共同点都是认为鄂尔多斯盆地伊陕斜坡三叠系延长组油藏的形成和分布并非受单一因素控制,而是受烃源和储层等多重因素控制。在多因素控藏理论的指导下,鄂尔多斯盆地油气勘探不断取得新的进展。

然而,无论是传统的岩性油藏理论,还是多因素控藏理论,其提出的成藏模式都无法完全解释鄂尔多斯盆地致密砂岩大油气田的独特性质。其主要特殊性如:油气藏大面积连续或准连续分布,无明确的油藏边界;油、水分布复杂,油、水分异差,一般无明确的边底水,无明显的油、水界限。

3.3 连续型油气聚集论

由于传统成藏理论难以解释鄂尔多斯盆地低渗透致密砂岩油藏独特的成藏特征,近年来邹才能等^[50-51]引进了连续型油气成藏理论,认为鄂尔多斯盆地的致密油和致密气都属于连续型油气聚集。

“连续型油气藏”或“连续型油气聚集”(continuous accumulation)的概念系20世纪90年代中期由美国地质调查局提出^[52-56],认为致密砂岩油气藏、盆地中心气、页岩气、煤层气和天然气水合物等属此类型。他们指出,连续聚集是指空间分布范围大、无清晰边界的油气聚集,且其或多或少不依赖于水柱而存在^[54]。他们认为,连续聚集与常规聚集的区别,在于常规油气聚集是由于油或气在水中的浮力而造成在局部构造或地层圈闭中的聚集,从而形成不连续分布的油气田或油气藏^[57];而连续型油气聚集具有两大共同特征,一是由普遍有油或气充注的巨大体积的岩石体构成,二是不依赖于油或气在水中的浮力而存在^[57-58]。

连续油气聚集的地质特征一般为:分布于饱和水的岩石下倾方,缺乏明显的圈闭和盖层,油或气普遍性的充注,广大的分布范围,低的基质渗透率,异常压力(高或低),以及与源岩紧密联系。其生产特征通常是:原地油气数量大,采收率低,缺乏真正意义上的干井,依赖于裂缝渗透率,以及聚集中一般具有良好生产特征的甜点^[52,57]。

美国地质调查局全国油气资源评价团队负责人 Schenk^[59]提出,判别连续天然气聚集的地质标准有以下16条:区域性分布;具有扩散性边界;先存各“油气田”合并为单个的区域性聚集;无明显的圈闭和盖层;无明确的油-水或气-水界面;烃类侵位不是由水动力引起;通常具有异常地层压力;资源量巨大、采收率很低;地质控制的“甜点”;产自由水很少(煤层气除外);地层水一般位于油气的上倾方向;真正的干井很少;储层一般邻近源岩;油井或气井最终采出量低于常规气藏;储层基质渗透率很低;储层普遍发育天然裂缝。在2005年召开的 AAPG Hedberg 会议上, Schenk^[60]又将这些特征进一步扩展到连续油和气聚集(而不仅是连续气聚集),认为一个连续油或气聚集可能具有全部或其中部分特征。

SPE, AAPG, WPC 和 SPEE^[61]将“连续型矿藏”(continuous-type deposit)定义为:遍布于广大地区且不受水动力显著影响的油气聚集。该4家组织列出的连续型矿藏种类除包括“盆地中心”气、页岩气和气水合物外,还包括天然沥青和油页岩,其所称的连续型矿藏与非常规油气在概念上基本相同,这与美国地质调查局的理解不完全相同。

4 准连续型大油田成藏模式的提出及其特征

4.1 准连续型大油田成藏模式

对鄂尔多斯盆地油藏形成与分布规律的研究表明,其三叠系延长组致密及部分近致密(或低渗透)砂岩油藏并非以往普遍认为的常规意义上的岩性油藏,也非典型的连续型非常规油藏,而是介于常规油藏与非常规油藏或不连续与连续型油藏之间的一种过渡类型,笔者称之为“准连续型油气藏”或“准连续型油气聚集”^[62-63]。所谓准连续型油气藏,是指油气聚集受非常规圈闭控制、油气藏大面积准连续分布及无明确油气藏边界的致密油气聚集(图4)。这里所说的非常规圈闭,是指介于常规油气藏那种“有”圈闭与典型连续型非常规油气藏那种“无”圈闭之间的一种过渡类型圈闭,或者说是介于有形的常规圈闭与无形的非常规圈闭之间的一种过渡类型圈闭。对致密油气聚集而言,常见的非常规圈闭主要是非常规的岩性圈闭与动力圈闭。所谓非常规岩性圈闭,是指由许多在横向上彼此相邻、纵向上相互叠置的中、小型岩性圈闭构成的大面积分布的圈闭群。与常规岩性圈闭相比,非常规岩性圈闭的主要特点是数量众多,且彼此邻近,缺乏明确的边界;而常规岩性圈闭往往呈孤立分散分布,界限相对明确。除了非常规岩性圈闭外,油气运移聚集动力对准连续型致密油气藏的形成和分布也具有重要控制作用,其所决定的油气运移聚集范围就是动力圈闭的范围。“动力圈闭”是李明诚和李剑(2010)^[64]针对低渗透致密储层油气藏形成所提出的一种新的圈

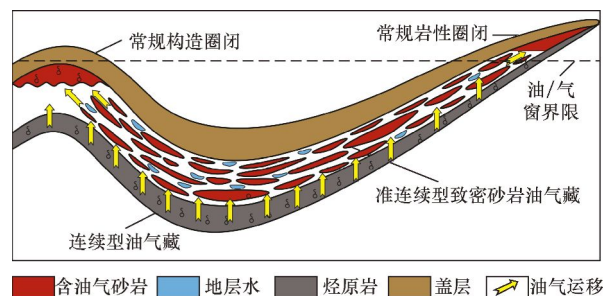


图4 鄂尔多斯盆地致密砂岩准连续型油气藏模式

Fig. 4 Diagram showing the pattern of quasi-continuous tight sand hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin

闭类型,认为动力圈闭是油气被超压充注到低渗透致密储层中最重要的一种成藏作用,也是在低渗透致密储层中能滞留油气聚集成藏的一个三维空间。准连续型油气藏就是在非常规岩性圈闭和动力圈闭等非常规圈闭控制下形成的一种与连续型油气藏相类似的油气聚集。与典型连续型非常规油气藏(煤层气和页岩气)不同的是:准连续型油气藏为源外成藏、近源聚集,油气呈准连续分布,圈闭介于有形与无形之间;而连续型油气藏为源内成藏、自生自储,油气呈连续分布,无明显圈闭等。

事实上,连续型非常规油气藏与不连续的常规油气藏分别代表了复杂地质环境中油气藏形成序列中的两种端元类型,二者之间理应存在不同的过渡类型。鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩油气藏就代表了非常规的连续型油气藏与不连续的常规油气藏之间的一种过渡类型。

4.2 鄂尔多斯盆地准连续型大油田成藏特征

鄂尔多斯盆地准连续型大油田的形成与分布主要具有以下特征。

1) 油藏大面积准连续分布,无明确边界

常规的油气藏一般分布不连续,分布面积较小,大多在几至几十平方千米,大者一般不过数百平方千米。而鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密砂岩油藏分布广泛。早在20世纪60—70年代,我国老一辈石油地质家们就已发现了延长组“井井见油,井井不流”的现象。经过几十年的探索,现已发现三叠系延长组致密砂岩油藏具有“一大三

低”特征,即分布面积大、丰度低、渗透率低和产量低;油藏面积一般在几十至上千平方千米,大多在上百平方千米;而且,致密砂岩油藏多无明确的边界(图5),目前划定的边界多属于人为边界,包括勘探开发工作程度边界或经济边界。随着勘探开发范围的拓展,含油面积大多都会进一步扩大;或者随着油层改造技术的进步或油价的上升,一些原来认为低产的甚至仅见显示的井可能会变为有经济价值的生产井。事实上,鄂尔多斯盆地三叠系延长组“井井见油”的现象正是准连续型油藏成藏特征的反映;而“井井不流”则主要是由于过去普遍将这类油藏作为常规油藏,从而采用常规试油和开采技术(如“不压而试”)进行勘探的原因。20世纪80年代以来,由于采用先进的非常规油层改造技术等措施,鄂尔多斯盆地才走出了“井井见油,井井不流”的勘探开发困境,石油勘探开发不断取得重要突破。

2) 大范围生烃,高强度充注

鄂尔多斯盆地中生界烃源岩主要分布在三叠系延长组长₄₊₅—长₉段,主要为半深湖—深湖相沉积。其中长₇段烃源岩分布范围最大,有机质丰度也较高,已证实为鄂尔多斯盆地中生界油藏的主力源岩。该套主力烃源岩(“张家滩黑页岩”)为一套以黑色页岩、油页岩为主的优质生油岩,其深湖区沉积面积达 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,加上外围浅湖区面积 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,总面积约达 $8.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图6)。其厚度在东部清涧河一带为5~10 m;至志丹地区一般厚达30 m以上;最厚在富县湖盆中心可达120 m以上,单层厚度可达60 m以上。正

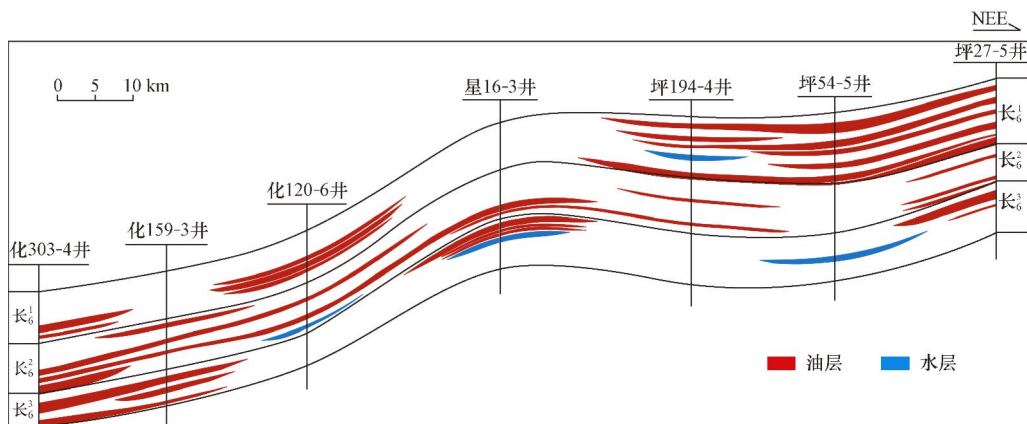


图5 安塞油田长₆油藏剖面

Fig. 5 Cross profile of Chang-6 reservoirs in Ansai oilfield

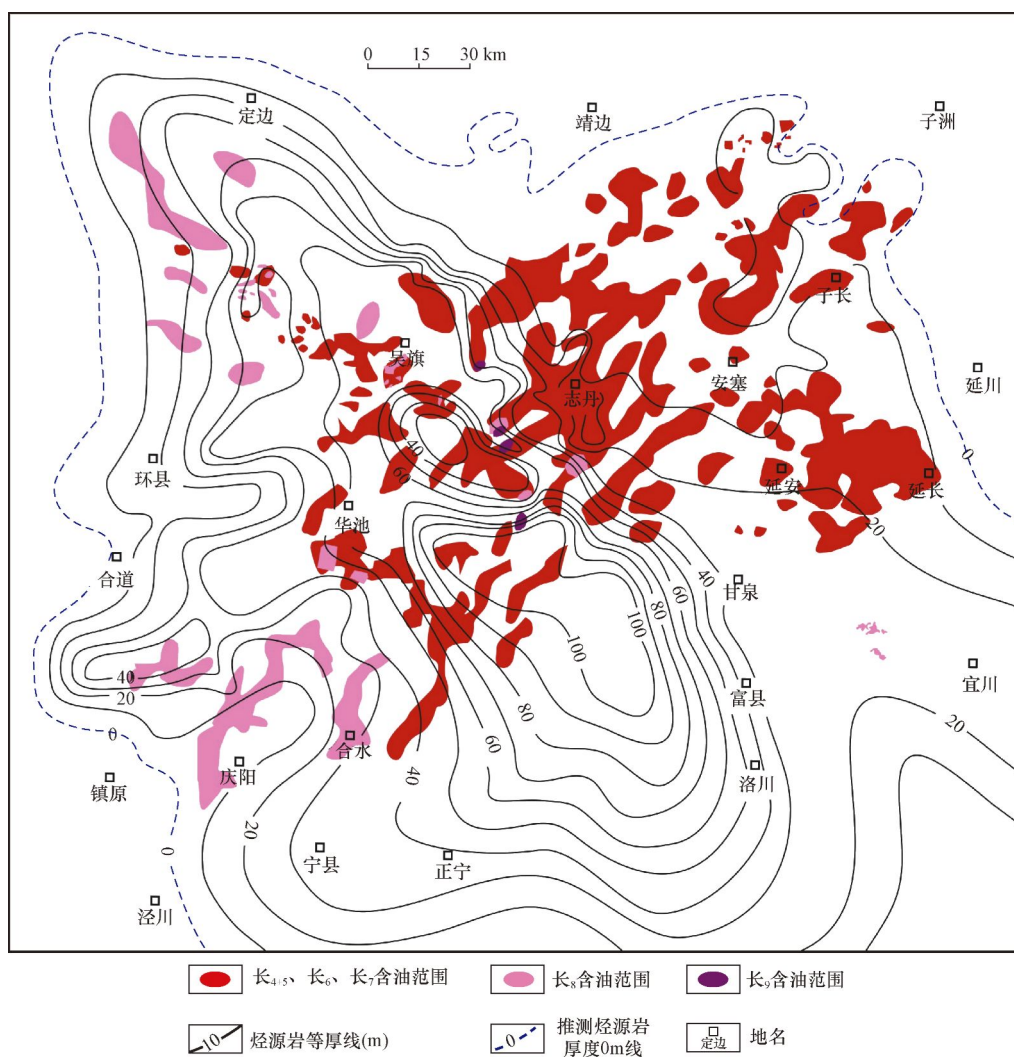
图6 鄂尔多斯盆地三叠系致密油分布与长₇ 烃源岩关系

Fig. 6 Relations between the distribution of the Triassic tight oil reservoirs with the Chang-7 source rocks in Ordos Basin

因如此,长₇ 烃源岩控制了鄂尔多斯盆地中生界绝大部分油藏的分布,尤其是长₈ 以上地层的油藏分布。另外,长₉ 李家畔页岩是鄂尔多斯盆地另一套重要的油源岩。该套烃源岩有机质丰度也较高,其总有机碳含量分布在 1.19% ~ 8.64%,平均值达 5.03%;氯仿沥青“A”含量分布于 0.472 4% ~ 1.299 7%,平均为 0.860 3%^[65]。但该套油源岩分布比较局限,主要分布于志丹—甘泉—富县一带,厚度最大可达 20 m^[66]。油-源对比表明,长₉ 烃源岩主要控制了长₉ 和长₁₀ 油藏的分布,对长₈ 油藏可能也具有一定控制作用^[66-67]。由于分布面积大、有机质丰度高、类型好及成熟度适中,加之大量生烃在长₇ 等主要烃源岩内产生了广泛分布的超压现象,为油气向外排出和向邻近致密储层充

注提供了充足的动力,从而使得长₇ 段等优质烃源岩在盆地内表现为大面积生烃和高强度充注的特点,形成了长₆ 和长₈ 等致密储层普遍含油的面貌。

3) 储层物性差,非均质性强

鄂尔多斯盆地三叠系延长组中、下组合储层是中生界油层物性最差的层位,主体为致密砂岩储层;其次为近致密(低渗透)储层,平均孔隙度一般小于 12%,平均渗透率一般小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而且,由于其储层主要为叠加复合成因,因而储层非均质性较强,岩性和物性在横向上变化大,单个砂体在横向上连续性差。如此差的储层,之所以能够形成大面积准连续分布的油藏,主要是由于其与同样广泛分布的长₇ 主力烃源岩相邻近,从而具有优越的供烃条件。另一方面,储层致密、非均

质性强,使得油气在长₆和长₈等致密储层中很难进行长距离运移从而形成集中分布,而是表现为大面积低丰度分布的特征。相反,在远离烃源岩的长₂段及侏罗系延安组,由于其储层物性好、接近常规储层,油气相对较容易在其中进行侧向运移集中,加之供烃条件较差,从而形成了相对孤立分散分布、规模相对较小、受构造圈闭一定控制的构造-岩性复合油藏甚至构造油藏^[47]。

4) 圈闭介于常规圈闭与无圈闭之间

常规油气藏的形成离不开圈闭,且圈闭界限明确。而鄂尔多斯盆地中生界致密砂岩油藏的圈闭并非传统意义上的圈闭形式,而是介于常规圈闭与无圈闭之间、或有形与无形圈闭之间的一种过渡类型,为一种特殊的非常规圈闭。其主要形式就是非常规的岩性圈闭,表现在圈闭由众多中、小型岩性圈闭或甜点在纵向上叠合、在平面上复合而成,无明确的边界。这是由于三叠系延长组为一套河流-三角洲相沉积,经历了多个沉积旋回的更替演化,其结果造成了延长组各层段河道沉积在纵向上往往多期叠加,在平面上常常多期复合,从而形成了大面积连片分布的叠加复合砂体构型,其突出特征表现为储层非均质性强,岩性和物性在横向上变化大。加之,盆地内断裂和褶皱构造不发育。因此,三叠系延长组长₆和长₈等致密储层的圈闭并不像常规构造油气藏或岩性油气藏那样其圈闭是呈孤立分散分布的,而是由众多中、小型岩性圈闭或甜点在纵向上相互叠置、在横向上复合连片,从而形成大面积分布的彼此相邻、相接的岩性圈闭群或甜点群面貌(图5)。

除了非常规岩性圈闭外,动力圈闭可能也是控制鄂尔多斯盆地致密油藏形成的一种特殊的圈闭类型。压力演化史研究表明,三叠系延长组主力烃源岩在地质历史上曾形成过普遍的超压。这是鄂尔多斯盆地致密油气运移充注的主要动力(详见后文),它对中生界致密油藏的形成和分布起了重要控制作用。

5) 油、水分异差,无明显边、底水

常规油气藏一般油、气、水分异明显,具有明确的边水或底水。然而,大量试油、试采结果表明,鄂尔多斯盆地三叠系延长组已发现的长₆等致密砂岩油藏基本上均无边、底水,油、水同储同出,基本上不存在纯油层,纯水层也较少,而以油、水同层为主。这与典型的常规岩性油气藏明

显有别。造成长₆等致密油藏油、水同储同出、缺乏边、底水的原因,主要是由于其储层致密,孔隙喉道细小,横向上岩性物性变化大,加之地层平缓,油、水难以在其中形成良好分异,从而形成油、水同储及自由水缺乏的现象。而成藏时期储层已经比较致密,这可能是造成油藏中自由水较少的一个重要原因。另外,由于油、水分异差及自由水缺乏,长₆等致密砂岩油藏不仅边、底水缺乏,而且也不存在上倾地层水或区域性油、水倒置的现象。

分析鄂尔多斯盆地致密砂岩油藏油、水分布复杂的原因,一方面与储层致密、非均质性强有关,另一方面与油气充注和运移方式也有密切联系。由于油气充注主要为广泛的垂向充注方式,且进入储层后难以进行长距离运移,而主要为就近运移聚集成藏,因而必然造成气、油、水分异差和分布复杂及产水不多但较普遍的现象。

6) 油藏压力系统复杂,多具负压异常

鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密砂岩油藏现今地层压力分布复杂,同一油藏一般不具备统一的压力系统,反映油藏内部连通性差。这与储层致密、非均质性强密切相关。而且,现今地层压力普遍表现为负压特征。如安塞的杏子川油田,其现今延长组储层压力系数小于0.8,主要分布在0.4~0.8,表现为以异常低压为特征。

研究表明,鄂尔多斯盆地之所以普遍存在负压现象,主要是由于盆地在后期经历了较强烈的构造抬升剥蚀所致,同时也与储层非均质性强、连通性差有关。由于储层连通性差,造成流体难以在储层内部进行交流和平衡,从而很难形成正常压力系统。

7) 油气运移聚集为非浮力驱动,近距离运移成藏为主

研究表明,鄂尔多斯盆地三叠系延长组中、下部储集层在石油大量生成时期,储集层已致密化^[68-69]。而且,由于成藏时期地层已经比较平缓,加之储层致密,自由水很少,因而浮力和水动力很弱,难以成为油气在储层中运移的有效动力,对油气运移贡献不大。另外,由于储层非均质性强,横向上岩性物性变化较大,因而也不具备油气长距离侧向运移的输导条件。可见,油气在三叠系延长组致密砂岩储层中既缺乏充足的运移动力,又缺乏良好的运移通道,从而很难发生大规模长

距离侧向运移而形成集中分布,而只能是短距离运移、近源成藏及低丰度广布。另一方面,研究表明鄂尔多斯盆地三叠系延长组在长₄₊₅以下普遍存在着古超压现象^[68-70],且过剩压力在长₇主力烃源岩段达到最大,自此向上、向下过剩压力减小(图7)。分析认为,长₇等烃源岩层段的超压与生烃作用存在着密切的因果关系,其与上、下致密储层间产生的源、储过剩压力差正是油气自烃源岩向致密储层运移充注的主要动力。在源、储过剩压力差的作用下,油气的初次运移必然表现为以垂向运移为主。由于缺乏长距离二次运移,油气运移主要为垂向运移形式,因而造成储层中油、水关系复杂及油、水同储同出。

8) 油藏形成和分布基本不受构造控制,而主要受烃源和储层控制

对鄂尔多斯盆地中生界致密砂岩油气分布规律的研究发现,三叠系延长组中、下组合目前已发

现的致密砂岩油藏在平面上大面积分布,基本上不受局部构造所控制(图3,图8)。与其相反,三叠系延长组上组合油藏以及侏罗系延安组油藏的形成和分布与构造因素有着密切关系,油藏类型主要为岩性-构造复合油藏甚至构造油藏^[45-47]。

研究表明,控制鄂尔多斯盆地致密砂岩大油田形成和分布的主要因素是烃源和储层条件,其次是盖层的控制作用,其中烃源条件是控制鄂尔多斯盆地致密砂岩大油田形成和分布最主要的因素。可以说,有效烃源岩分布在哪里,致密砂岩油藏就可能延伸到哪里。勘探开发实践表明,中生界油藏主要就分布于三叠系延长组有效烃源岩特别是长₇主力烃源岩展布区及其附近,即主要限于横山—盐池以南,特别是定边—靖边—子洲以南的盆地南部广大地区(图6)。纵向上,延长组油藏主要分布于主力烃源岩上、下相邻层位。正是由于发育了广泛分布的长₇段优质烃源岩,才形成

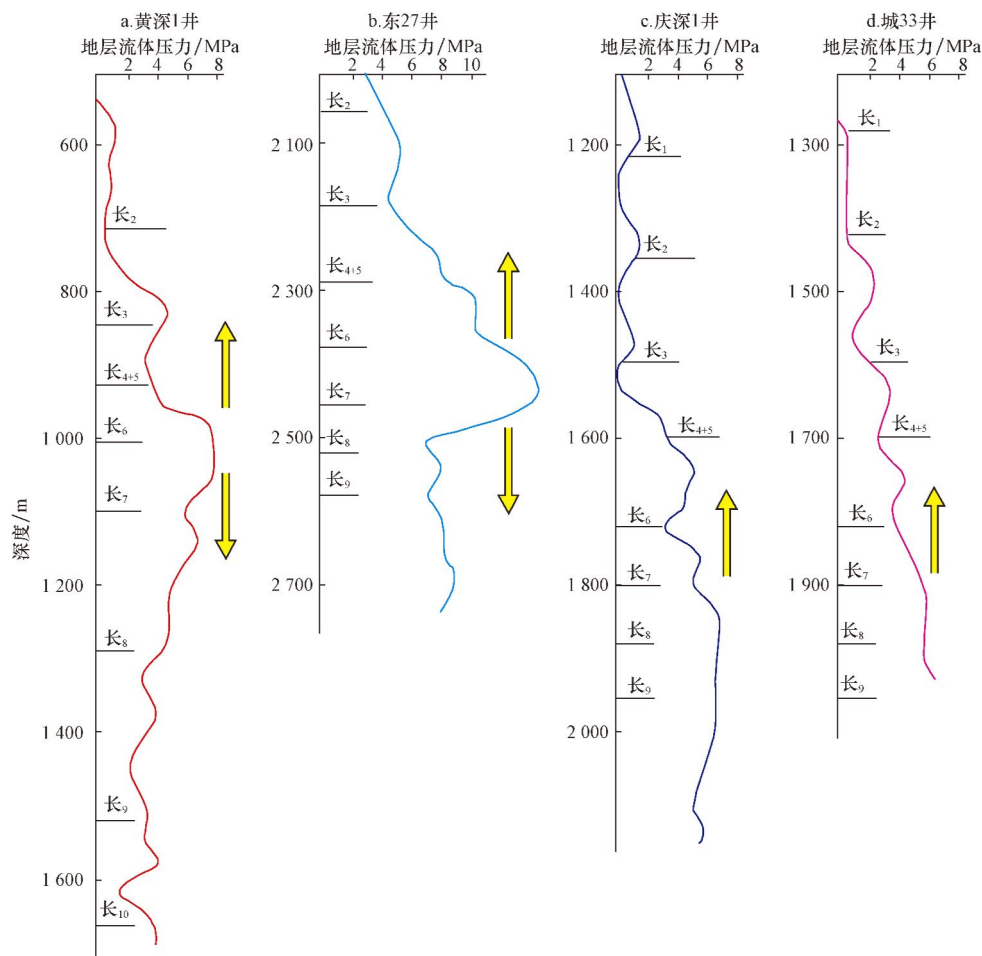


图7 鄂尔多斯盆地三叠系延长组地层流体压力与深度关系^[70]

Fig. 7 Relations between formation fluid pressure and burial depth of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin^[70]

10) 资源丰富,勘探开发潜力大

由于鄂尔多斯盆地中生界优质烃源岩分布广,并发育长₇和长₉两套优质烃源岩,而且三叠系中下组合致密砂岩和近致密砂岩储层广布,并与长₇和长₉等优质烃源岩相邻近,加之保存条件优越,因而决定了鄂尔多斯盆地三叠系中、下组合低渗透致密砂岩石油资源丰富,勘探开发潜力较大,且以形成大面积分布的准连续型油藏为主。事实上,准连续型成藏模式的发现,预示着鄂尔多斯盆地三叠系低渗透致密砂岩尽管石油资源丰度低,但资源丰富。

按照笔者提出的油气资源三角图新概念(图9),油气资源按品质和潜力可分为3级,即位于三角图顶部的不连续聚集的常规油气、中部准连续聚集的致密油气和底部连续型聚集的源内油气(煤层气、页岩气等)。据此预测,致密油气资源在鄂尔多斯盆地可能较以往认为的还要丰富,其资源量虽可能小于页岩油气和煤层气等烃源岩层内聚集的油气资源数量,但可能远大于该盆地常规油气的资源量。

然而,由于准连续型油气聚集既不同于常规岩性油气藏成藏模式,又不同于典型的连续型油气聚集模式,这意味着传统的常规油气和非常规油气地质研究和勘探思路在鄂尔多斯盆地均不完全适用。鄂尔多斯盆地致密砂岩油气的地质研究和勘探思路应当针对准连续型油气聚集的特点,既要汲取常规油气地质研究和勘探的思路和方法,又要汲取非常规油气的思路和方法。

准连续型油气成藏模式的提出,对其他地区致密油的勘探开发也具有重要借鉴意义。据初步

调研,致密油在我国除鄂尔多斯盆地广泛分布外,四川盆地等地区也有分布。其中,四川盆地中北部侏罗系油藏具有储层致密、油藏分布面积大、不受局部构造等圈闭控制、与烃源岩联系紧密及无边底水等特征^[71-72],与鄂尔多斯盆地致密油藏十分相似,推测其同样属于准连续型油气聚集,因而具有较大的勘探潜力。

5 结论

1) 文中将致密油藏定义为:储层致密、只有经过大型压裂改造等特殊措施才可以获得经济产量的烃源岩外油藏,其储层绝对渗透率约小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度约小于12%。在此基础上,将含油储层按渗透率分为致密层(渗透率 $< 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、近致密储层或低渗透储层(渗透率为 $2 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和常规储层(渗透率 $> 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)3类。

2) 鄂尔多斯盆地中生界大油田与石油资源主要赋存于三叠系延长组中、下组合的致密砂岩储层中,其次为近致密砂岩储层(低渗透储层)。

3) 鄂尔多斯盆地三叠系延长组中、下组合的致密砂岩和部分近致密砂岩(低渗透砂岩)油藏并非以往普遍认为的常规意义上的岩性油藏,也非典型的连续型非常规油藏,而是介于常规油藏与非常规油藏或不连续与连续型油藏之间的一种过渡类型,称之为准连续型油气聚集。其主要特点是:油气大面积准连续分布,无明确油气藏边界;圈闭介于常规圈闭与无圈闭之间,主要由非常规岩性圈闭和动力圈闭组成;油、水分布复杂,无明显边、底水;油气运移为非浮力驱动,近距离成藏。与典型的连续型非常规油气藏不同的是,准连续型油气藏为源外成藏,近源聚集,油气呈准连续分布,圈闭介于有形和无形之间;而连续型油气藏则为源内成藏,自生自储,油气连续分布,无明显圈闭。

4) 控制鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大油田形成和分布的主要因素是烃源和储层条件,其次是盖层条件。其中,烃源条件是控制鄂尔多斯盆地致密砂岩大油田形成和分布最主要的因素。受其控制,中生界油田主要分布于盆地南部(定边—靖边—子洲以南)长₇和长₉烃源岩分布区及其附近。

5) 准连续型致密砂岩成藏模式的提出,预示

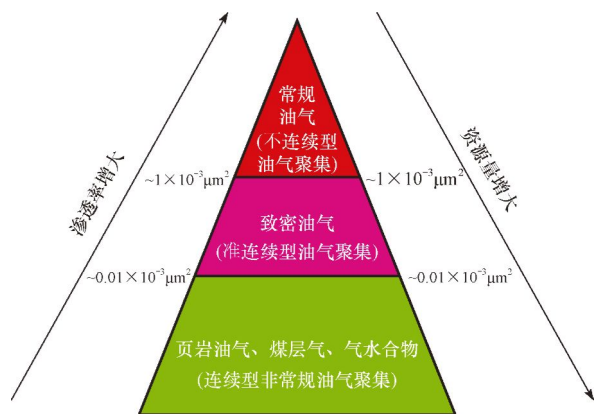


图9 新油气资源三角图

Fig. 9 New triangle of petroleum resources

着鄂尔多斯盆地中生界石油资源丰富,勘探开发潜力较大。但另一方面,准连续型成藏模式的提出,也意味着传统的常规油气地质学研究思路及勘探对策在鄂尔多斯盆地并不完全适用,新的地质研究和勘探思路应该汲取非常规油气的思路和方法。

参 考 文 献

- [1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1997:354.
Li Daopin. Development of low-permeability oil fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:354.
- [2] 赵澄林,胡爱梅,陈碧珏,等. SY/T6285—1997, 油气储层评价方法(中华人民共和国石油天然气行业标准)[S]. 北京:石油工业出版社,1998:16.
Zhao Chenglin, Hu Aimei, Chen Biyu, et al. SY/T6285—1997, assessment method of petroleum reservoirs (The petroleum standard of People's Republic of China) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998:16.
- [3] 赵靖舟,吴少波,武富礼. 论低渗透储层的分类与评价标准——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 28—31.
Zhao Jingzhou, Wu Shaobo, Wu Fuli. The classification and evaluation criterion of low permeability reservoir; an example from Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 28—31.
- [4] 胡文瑞. 低渗透油气田概论[M]. 北京:石油工业出版社, 2009:246.
Hu Wenrui. Theory of low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:246.
- [5] Spencer C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(8): 1308—1314.
- [6] Spencer C W. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in western United States[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(5): 613—629.
- [7] Kuuakfaa V A, Haas M R. Natural gas from low permeability formations[J]. SPE 17746, 1988: 1—18.
- [8] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851—1852.
- [9] 袁政文,朱家蔚,王生朗,等. 东濮凹陷沙河街组天然气储层特征及分类[J]. 天然气工业, 1990, 10(3): 6—11.
Yuan Zhengwen, Zhu Jiawei, Wang Shenglang, et al. Characteristics and classification of gas reservoirs in Shahejie Formation in Dongpu Depression[J]. Natural Gas Industry, 1990, 10(3): 6—11.
- [10] 许化政. 东濮凹陷致密砂岩气藏特征的研究[J]. 石油学报, 1991, 12(1): 1—28.
Xu Huazheng. Characteristics of tight sand gas reservoir in Zhongyuan Oil Field and its exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 12(1): 1—28.
- [11] Byrnes A P. Reservoir characteristics of low-permeability sandstones in the Rocky Mountains[J]. The Mountain Geologist, 1997, 34(1): 39—51.
- [12] Nehring R. Growing and indispensable: the contribution of production from tight-gas sands to US gas production[C]//Cumella S P, Shanley K W, Camp W K. Understanding, exploring, and developing tight-gas sands—2005 Vail Hedberg Conference. AAPG Hedberg Series, 2008: 5—12.
- [13] 杨华,付金华,喻建. 陕北地区大型三角洲油藏富集规律及勘探技术应用[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 6—10.
Yang Hua, Fu Jinhua, Yu Jian. Oil reservoir enrichment patterns of large delta systems and application of exploration techniques in Shanbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 6—10.
- [14] 付金华,罗安湘,喻建,等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向[J]. 石油学报, 2004, 25(2): 25—29.
Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, et al. Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng oil field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 25—29.
- [15] 王昌勇,郑荣才,李忠权,等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8油层组岩性油藏特征[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 69—74.
Wang Changyong, Zheng Rongcai, Li Zhongquan, et al. Characteristics of lithologic reservoir of interval 8 of Yanchang Formation in Jiyuan oil field of Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(3): 69—74.
- [16] 王桂成,王羽君. 鄂尔多斯盆地英旺油田长8储层非均质性研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2010, 25(5): 16—19, 24.
Wang Guicheng, Wang Yujun. The heterogeneity study of Chang 8 reservoir in Yingwang oil field of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(5): 16—19, 24.
- [17] 郭德运,郭艳琴,李文厚,等. 富县探区上三叠统延长组长8油藏富集因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 93—97.
Guo Deyun, Guo Yanqin, Li Wenhui, et al. Oil accumulation factors of Chang 8 oil reservoir of Yanchang formation of Upper Triassic in Fuxian exploration area[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 93—97.
- [18] 段毅,于文修,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地长9油层组石油运聚规律研究[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 855—860.
Duan Yi, Yu Wenxiu, Liu Xianyang, et al. Oil migration and accumulation rules of Chang-9 oil-bearing formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 855—860.
- [19] Fuller M L, Clapp F G. Oil prospects in northeastern China[J]. AAPG Bulletin, 1926, 10(11): 1073—1117.
- [20] 杨俊杰,李克勤,宋国初,等. 中国石油地质志(卷十二)[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
Yang Junjie, Li Keqin, Song Guochu, et al. Petroleum geology of China (Volume 12) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.

- [21] 朱明恭,谢广成. 延长—永坪油田群[M]//张文昭. 中国大油田勘探实践. 北京:石油工业出版社,2002:314-328.
Zhu Minggong, Xie Guangcheng. Yanchang - Yongping oil fields [M]//Zhang Wenzhao. Exploration practice in major oilfields of China. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 314-328.
- [22] 孙肇才,谢秋元. 叠合盆地的发展特征及其含油气性——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油实验地质, 1980, (1): 13-21.
Sun Zhaocai, Xie Qiuyuan. Development features and oiliness of superimposed basin—take the Ordos Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1980, (1): 13-21.
- [23] 孙国凡,谢秋元,刘景平,等. 鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油气性——中国大陆板块内部一个大型盆地原型分析[J]. 石油与天然气地质, 1986, 7(4): 356-367.
Sun Guofan, Xie Qiuyuan, Liu Jingping, et al. Evolution stacking and hydrocarbon potential of the Ordos Basin—prototype analysis of a huge basin in Chinese continental plate[J]. Oil & Gas Geology, 1986, 7(4): 356-367.
- [24] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1989: 394.
Zhang Kang. The structure and resources of fault-block in Ordos Basin [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989: 394.
- [25] 李克勤. 最佳成油配置及低渗油层找油[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(4): 21-27.
Li Keqin. Optimum combination of oil generation, migration and accumulation and its role in the formation of tight oil reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(4): 21-27.
- [26] 李克勤. 陕甘宁地区上三叠统隐蔽低渗油藏的找油方向[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 31-38.
Li Keqin. Where to find subtle oil pools with low permeability in the Upper Triassic of Shaan-Gan-Ning Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 31-38.
- [27] 朱国华,王文炯. 论陕北安塞延长组三角洲的油气富集条件[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(4): 440-447.
Zhu Guohua, Wang Wenjong. A discussion on delta hydrocarbon accumulation of Yanchang formation in Ansai, North Shaanxi [J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(4): 440-447.
- [28] 张松扬. 大牛地气田致密砂岩储层测井评价[J]. 石油物探, 2010, 49(4): 415-420.
Zhang Songyang. Logging evaluation technique for tight sandstone reservoir in Daniudi Gasfield [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 415-420.
- [29] 梅志超,彭荣华,杨华,等. 陕北三叠统延长组含油砂体的沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(3): 261-267.
Mei Zhichao, Peng Ronghua, Yang Hua, et al. sedimentary environment of the oil-bearing sand bodis in the Upper Triassic Yanchang formation of Northern Shaanxi [J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(3): 261-267.
- [30] 王锡福,宋国初. 陕甘宁盆地油气藏形成条件及分布特征[M]//中国石油学会石油地质委员会. 中国油气藏研究. 北京:石油工业出版社, 1990: 199-207.
Wang Xifu, Song Guochu. The formation condition and distribution features of petroleum accumulations in Shan-Gan-Ning Basin [M]//China Society of Petroleum Committee of Petroleum Geology. Study on petroleum reservoirs in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 199-207.
- [31] 杨俊杰,宋国初. 陕北上三叠统三角洲沉积与油气藏形成[M]//杨俊杰. 低渗透油气藏勘探开发技术. 北京:石油工业出版社, 1993: 50-57.
Yang Junjie, Song Guochu. The delta sediment and the formation of petroleum reservoir in the Upper Triassic, North Shaanxi [M]//Yang Junjie, Song Guochu. Exploration technology of the low permeable petroleum reservoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 50-57.
- [32] 胡文瑞. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发理论与技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2000: 213.
Hu Wenrui. The theory and technology of petroleum exploration in Ordos Basin [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 213.
- [33] 陈安宁,韩永林,杨彪,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长统成藏地质特征及油藏类型[C]//长庆油田公司勘探开发研究院. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集(1990—2000). 北京:石油工业出版社, 2000: 33-46.
Chen Anning, Han Yonglin, Yang Biao, et al. The geological accumulation features and its types of Yanchang Formation in the Triassic in Ordos Basin [C]//Changqing Oilfield Company Exploration and Development Institute. Symposium of the petroleum exploration in the Ordos Basin (1990-2000). Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 33-46.
- [34] 王道富,张明禄,史成恩,等. 鄂尔多斯盆地中生界石油滚动勘探开发技术[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 82-88.
Wang Daofu, Zhang Minglu, Shi Cheng'en, et al. The rolling exploration and development technology of Mesozoic petroleum in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(4): 82-88.
- [35] 肖晖,吴小斌,何丹,等. 鄂尔多斯盆地镇川地区长3低渗储层特征及其控制因素[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 701-704.
Xiao Hui, Wu Xiaobin, He Dan, et al. Characteristics and control factors of Chang 3 reservoir with low permeability in Zhenchuan Area, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 701-704.
- [36] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 228.
Yang Junjie. Tectonic evolution and petroleum distribution of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 228.
- [37] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 390.
He Zixin. The evolution and petroleum of the Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 390.

- [38] 喻建,宋江海,向惠.鄂尔多斯盆地中生界隐蔽性油气藏成藏规律[J].天然气工业,2004,24(12):35-37.
Yu Jian, Song Jianghai, Xiang Hui. Subtle reservoir formation law of Mesozoic in Ordos Basin. [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 35-37.
- [39] 朱国华.陕北延长统砂体成岩作用与油气富集的关系[J].石油勘探与开发,1985,12(6):1-9.
Zhu Guohua. Relation between the accumulation of hydrocarbons and the diagenesis of Yanchang sandbodies in Shaanxi Province[J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(6): 1-9.
- [40] 杨昀.鄂尔多斯盆地南部中生界成岩圈闭[J].石油勘探与开发,1996,23(3):34-39.
Yang Yun. Mesozoic diagenetic traps in the south of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(3): 34-39.
- [41] 张文昭.鄂尔多斯盆地大油气田形成的主要地质规律[J].中国海上油气(地质),1999,13(6):391-365.
Zhang Wenzhao. Main geological characteristics of the forming of giant oil-gas fields in Ordos Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1999, 13(6): 391-365.
- [42] 杨华,刘显阳,张才利,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透岩性油藏主控因素及其分布规律[J].岩性油气藏,2007,19(3):1-7.
Yang Hua, Liu Xianyang, Zhang Caili, et al. The main controlling factors and distribution of low permeability lithologic reservoirs of Triassic Yanchang formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 1-7.
- [43] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: geology and geochemistry[J]. Geochemica, 2005, 34(2): 147-154.
- [44] 张文正,杨华,李剑峰,等.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J].石油勘探与开发,2006,33(3):289-293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation—hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [45] 赵靖舟,武富礼,闫世可,等.陕北斜坡东部三叠系油气富集规律研究[J].石油学报,2006,27(5):24-34.
Zhao Jingzhou, Wu Fuli, Yan Shike, et al. Regularity of Triassic petroleum accumulation and distribution in the eastern part of North Shaanxi Slope[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 24-34.
- [46] 赵靖舟,杨县超,武富礼,等.论隆起背景对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡区三叠系油藏形成和分布的控制作用[J].地质学报,2006,80(5):648-655.
Zhao Jingzhou, Yang Xianchao, Wu Fuli, et al. Controlling of uplifts on the Triassic petroleum accumulation and distribution in North Shaanxi Slope, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 648-655.
- [47] 赵靖舟,王永东,孟祥振,等.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部三叠系长2油藏分布规律[J].石油勘探与开发,2007,34(6):1-9.
Zhao Jingzhou, Wang Yongdong, Meng Xiangzhen, et al. Law of petroleum accumulation and distribution in Triassic Chang 2 oil-bearing Formation in eastern North Shaanxi Slope, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 1-9.
- [48] 武富礼,赵靖舟,闫世可,等.陕北地区中生界石油补偿成藏规律研究[J].石油学报,2007,28(3):23-26.
Wu Fuli, Zhao Jingzhou, Yan Shike, et al. Regularity of Mesozoic petroleum compensation accumulation in the north of Shaanxi province. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 23-26.
- [49] 武富礼,王变阳,赵靖舟,等.鄂尔多斯盆地油藏序列特征及成因[J].石油学报,2008,29(5):639-642.
Wu Fuli, Wang Bianyang, Zhao Jingzhou, et al. Origin and characteristics of oil pool sequence in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 639-642.
- [50] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.连续型油气藏形成条件与分布特征[J].石油学报,2009,30(3):324-331.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [51] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2011:310.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 310.
- [52] US Geological Survey National Oil and Gas Resource Assessment Team. 1995 National assessment of United States oil and gas resources[R]. US Geological Survey Circular 1118, 1995: 20.
- [53] Gautier D L, Dolton G L, Takahashi K I, et al. 1995 national assessment of United States oil and gas resources—results, methodology, and supporting data[R/CD]. US Geological Survey Digital Data Series DDS-30, 1995.
- [54] Schmoker J W. Method for assessing continuous-type(unconventinal) hydrocarbon accumulations[R/CD] // Gautier D L, Dolton G L, Takahashi K I, et al. 1995 national assessment of United States oil and gas resources—results, methodology, and supporting data. US Geological Survey Digital Data Series DDS-30, 1995.
- [55] Schmoker J W. A resource evaluation of the Bakken Formation (Upper Devonian and Lower Mississippian) continuous oil ac-

- cumulation, Williston Basin, North Dakota and Montana [J]. The Mountain Geologist, 1996, 33(1): 1-10.
- [56] Schmoker J W, Fouch T D, Charpentier R R. Gas in the Uinta Basin, Utah—resources in continuous accumulations [J]. The Mountain Geologist, 1996, 33(4): 95-104.
- [57] Schmoker J W. US Geological Survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations: chapter 13 of petroleum systems and geologic assessment of oil and gas in the southwestern Wyoming province, Wyoming, Colorado, and Utah [R/CD]. US Geological Survey Digital Data Series DDS-69-D, 2005.
- [58] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [59] Schenk C J. Geologic definition and resource assessment of continuous (unconventional) gas accumulations—the US experience [C/OL]. AAPG ICE, 2002 [2010-10-20]. <http://www.searchanddiscovery.com/documents/abstracts/cairo2002/schenk.htm>.
- [60] Schenk C J. Geologic definition of conventional and continuous accumulations in select US Basins—the 2001 approach [C/OL]. AAPG Hedberg, 2005 [2012-10-20]. http://www.searchanddiscovery.com/documents/abstracts/2005hedberg_vail/abstracts/short/schenk.htm.
- [61] SPE, AAPG, WPC, SPEE. Petroleum resources management system [R/OL]. [2010-10-20] http://www.spe.org/industry/docs/Petroleum_Resources_Management_System_2007.
- [62] 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 论准连续型致密大油田成藏模式与形成条件 [C] // 首届非常规油气成藏与勘探评价学术讨论会论文及摘要集. 西安, 2011: 248.
- Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. On the accumulation model and formation condition of the large quasi-continuous tight oil and gas fields [C] // The first symposium on unconventional petroleum accumulation and exploration. Xi'an, Shaanxi, 2011: 248.
- [63] 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大油田成藏模式与分布规律 [C] // 首届非常规油气成藏与勘探评价学术讨论会论文及摘要集. 西安, 2011: 249.
- Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. The accumulation model and distribution law of the large quasi-continuous tight sand oil fields in the Ordos Basin [C] // The first symposium on unconventional petroleum accumulation and exploration. Xi'an, Shaanxi, 2011: 249.
- [64] 李明诚, 李剑. “动力圈闭”——低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用 [J]. 石油学报, 2010, 31(5): 718-722.
- Li Mingcheng, Li Jian. “Dynamic trap”: a main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 718-722.
- [65] 张文正, 杨华, 傅锁堂, 等. 鄂尔多斯盆地长₉湖相优质烃源岩的发育机制探讨 [J]. 中国科学 (D 辑), 2007, 37(S1): 33-38.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Fu Suotang, et al. A discussion on the development mechanism of Chang₉ high-quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Science (Series D), 2007, 37(S1): 33-38.
- [66] 李士祥, 刘显阳, 韩天佑, 等. 陕北地区延长组长 10 油层组成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 698-709.
- Li Shixiang, Liu Xianyang, Han Tianyou, et al. Characteristics of hydrocarbon pooling in Chang-10 interval of the Yanchang Fm in the northern Shaanxi province [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 698-709.
- [67] 张文正, 杨华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地长₉湖相优质烃源岩成藏意义 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 557-562, 568.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Shanpeng. Hydrocarbon accumulation significance of Chang₉ high-quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 557-562, 568.
- [68] 席胜利, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地中生界石油运移特征分析 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 229-235.
- Xi Shengli, Liu Xinshe, Wang Tao. Analysis on the migration characteristics of the Mesozoic petroleum in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(3): 229-235.
- [69] 刘新社, 席胜利, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移动力条件 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 143-147.
- Liu Xinshe, Xi Shengli, Huang Daojun, et al. Dynamic conditions of Mesozoic petroleum secondary migration, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 143-147.
- [70] 陈荷立, 刘勇, 宋国初. 陕甘宁盆地延长组地下流体压力分布及油气运聚条件研究 [J]. 石油学报, 1990, 11(4): 8-16.
- Chen Heli, Liu Yong, Song Guochu. An analysis of the distribution of subsurface fluid pressure and its relation to the petroleum migration and accumulation in Yanchang group, Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(4): 8-16.
- [71] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识 [J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.
- Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8-17.
- [72] 廖群山, 胡华, 林建平, 等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 815-822, 838.
- Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 815-822, 838.