

鄂尔多斯盆地陕北地区三叠系延长组长7—长9油层组 重力流沉积致密油富集条件与勘探潜力

——兼论拗陷型湖盆的石油勘探范式

赵靖舟^{1,2},高振东³,孟选刚³,吴伟涛^{1,2},白玉彬^{1,2},曹磊^{1,2},赵子龙^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065;2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室,陕西 西安 710065;
3. 延长油田股份有限公司,陕西 延安 716000)

摘要:鄂尔多斯盆地陕北定边—吴起—志丹—甘泉—富县一带延长组下组合(长7—长10油层组)是近年来延长油田重点勘探的地区和层系。通过对125口井、共计约2 115 m长的岩心观察,结合400余口井的粒度资料及系统的测井相分析,研究发现:①研究区长7—长9油层组广泛发育重力流沉积,并以砂质碎屑流沉积为主,其次为浊流沉积。②长7—长9油层组重力流沉积储层、烃源岩和封盖条件等均十分优越,致密油勘探潜力大,预测石油地质资源量约 25×10^8 t。③源—储—封组合类型是控制研究区长7—长9油层组致密油成藏和富集的主要因素,并将研究区源—储—封组合划分为4类11种,其中源夹储型和源上储下型最为有利。④建立了适用于鄂尔多斯盆地延长组烃源岩特征的烃源岩评价新标准,研究区长7—长9油层组三套烃源岩均为优质烃源岩,以长7油层组为最好,其次为长9油层组和长8油层组烃源岩。⑤提出了基于油井产量分级、富集指数及其地质控制因素分析的甜点评价方法。⑥中国油气勘探范式正在发生重要转变,勘探对象由浅水沉积向深水重力流沉积的转变,是拗陷型湖盆油气勘探的重要趋势之一。⑦拗陷型湖盆重力流沉积成藏条件优越,特别是砂质碎屑流沉积砂体规模大、物性好,含油性优于浊流沉积,且资源潜力大,应作为深水重力流沉积石油勘探开发的主要目标。

关键词:富集条件;勘探范式;重力流;致密油;延长组;拗陷型湖盆;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Geological conditions for tight oil enrichment and its exploration potential of gravity-flow deposits from the 7th to 9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin: Discussion on the petroleum exploration paradigms of downwarped lacustrine basins

ZHAO Jingzhou^{1,2}, GAO Zhendong³, MENG Xuangang³, WU Weitao^{1,2}, BAI Yubin^{1,2}, CAO Lei^{1,2}, ZHAO Zilong^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: The lower oil play, namely the 7th to 10th oil groups, of the Yanchang Formation in the Dingbian-Wuqi-Zhidan-Ganquan-Fuxian area of northern Shaanxi within the Ordos Basin, has emerged as a key target for the exploration of the Yanchang oilfield in recent years. In this study, we investigate this oil play by integrating observations of approximately 2 115 meters of cores from 125 wells, grain-size data from more than 400 wells, and a systematic analysis of logging facies. The results indicate that gravity-flow deposits are widely distributed across the 7th to 9th oil groups of the Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7–9 oil groups) in the study area. These deposits are dominated by sandy debris-flow deposits, followed by turbidity-current deposits. The gravity-flow deposits exhibit excellent source rock-reservoir-cap rock conditions and hold great potential for tight oil exploration, with possible petroleum initially-in-

收稿日期:2025-08-01;修回日期:2025-09-16。

第一作者简介:赵靖舟(1962—),男,教授,油气成藏与非常规油气地质学。E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050)。

place (PIIP) estimated at about 2.5×10^9 t. The type of source rock-reservoir-seal assemblages is identified as a major factor controlling the accumulation and enrichment of tight oil in the Chang 7–9 oil groups in the study area, and these assemblages therein can be classified into four categories with a total of 11 specific types. The configurations featuring reservoir interbedded with source rocks and vertically-stacked source and reservoir, among others, represent two most favorable assemblage categories for tight oil accumulation. Moreover, new evaluation criteria for source rocks of the Yanchang Formation in the Ordos Basin are established. These criteria highlight the predominance of excellent source rocks across the Chang 7–9 oil groups in the study area. Within this interval, the Chang 7 oil group is recognized as containing the most favorable source rocks, followed by the Chang 9 and Chang 8 oil groups. Furthermore, a new sweet spot assessment method is proposed based on the grading of well production, and the analysis of enrichment factor (*EF*) and associated geological controlling factors. China's hydrocarbon exploration paradigms are undergoing significant shifts, with a shift from shallow-water deposits to deep-water gravity-flow deposits representing a major trend in the hydrocarbon exploration of downwarped lacustrine basins. Specifically, gravity-flow deposits exhibit favorable hydrocarbon accumulation conditions in downwarped lacustrine basins. Particularly, sandy debris-flow deposits exhibit a larger scale, favorable physical properties, and better oil-bearing properties compared to the turbidity-current deposits, establishing them as a major target for petroleum exploration and exploitation of deep-water gravity-flow deposits.

Key words: enrichment condition, exploration paradigm, gravity flow, tight oil, Yanchang Formation, downwarped lacustrine basin, Ordos Basin

引用格式:赵靖舟,高振东,孟选刚,等.鄂尔多斯盆地陕北地区三叠系延长组长7—长9油层组重力流沉积致密油富集条件与勘探潜力——兼论拗陷型湖盆的石油勘探范式[J].石油与天然气地质,2025,46(5):1367–1391. DOI:10.11743/ogg20250501.

ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, MENG Xuangang, et al. Geological conditions for tight oil enrichment and its exploration potential of gravity-flow deposits from the 7th to 9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin: Discussion on the petroleum exploration paradigms of downwarped lacustrine basins[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1367–1391. DOI: 10.11743/ogg20250501.

深水重力流沉积研究始于 Kuenen 和 Migliorini (1950)发表的《浊流作为递变层理形成原因》^[1]一文。20世纪60年代初, Bouma (1962)基于野外剖面研究,提出了著名的“鲍马序列”^[2]。此后,浊流成为深水重力流研究的主要对象,直到20世纪70年代 Middleton 和 Hampton^[3]才将浊流理论扩展为重力流沉积理论。就重力流沉积的类型而言,目前还没有形成统一的认识。Middleton 和 Hampton^[3]根据颗粒悬浮机制将重力流分为由基质强度支撑的碎屑流、分散压力支撑的颗粒流、受向上逃逸流体压力支撑的液化沉积物流以及紊动支撑的浊流4种类型。Lowe (1979, 1982)按照流体流动状态将深水重力流分为流体态流和碎屑流两大类,并按照不同的颗粒支撑机制将流体态流分为浊流和流体化流,将碎屑流分为液化流、颗粒流和泥流或黏结性碎屑流,其中浊流又进一步分为高密度浊流和低密度浊流^[4–5]。然而, Lowe^[5]提出的高密度浊流受到 Shanmugam^[6]的质疑,后者提出用砂质碎屑流替代高密度浊流概念。值得注意的是,中国的深水重力流沉积研究自20世纪70年代开始后,长期聚焦于浊流沉积研究,直到邹才能等^[7]及李相博等^[8]在鄂尔多斯盆地三叠系延长组发现砂质碎屑流沉积后,重力流沉积研

究才更趋全面,特别是砂质碎屑流沉积开始受到广泛重视。之后,中国湖相研究还提出了异重流^[9]等其他重力流沉积认识,并开展了重力流沉积模拟实验研究^[10]。与此同时,许多学者进一步探讨了重力流的沉积模式及其勘探意义^[11–13]。

鄂尔多斯盆地的重力流沉积主要发现于三叠纪延长组沉积期古湖盆中心及其西南翼和南部地区。作为古湖盆的东北宽缓翼,陕北地区延长组长期以来被认为主要发育三角洲沉积^[14–16],因而其油气勘探主要以寻找三角洲油藏为目标,并取得了巨大成功,特别是作为三角洲建设高峰期的长6油层组及其以上层位,发现了安塞、靖安和延长等多个亿吨级大油田或油田群,形成了较为成熟的三角洲成藏理论与勘探思路和方法^[17–25]。

然而,随着长6油层组及以上层位油气勘探开发程度的不断加深和开发难度的日益增大,勘探的重点不得不转移至勘探程度较低的延长组下部,即长7—长10油层组(延长组下组合)。特别是在2019年长庆油田在盆地西南部长7油层组发现庆城10亿吨级超大型油田^[26]以来,加上此前西峰(长8油层组)和新安边(长7油层组)两个亿吨级大油田的发现,使得陕北地

区延长组下组合的勘探开发前景也受到有关石油企业和学术界的高度重视。然而,陕北地区延长组下组合尤其是长7—长9油层组与盆地西南部成藏条件是否可比、其油气成藏特征和富集规律与长6油层组以上层位是否相同、勘探潜力究竟有多大等,均不清楚。在此背景下,自2022年10月以来,笔者开展了定边—富县地区延长组长7—长9油层组致密油富集规律与甜点评价研究,研究范围包括定边、吴起、志丹、甘泉和富县(定边—富县)5个地区,研究区总面积22 072 km²,总井数11 342口。在此过程中,开展了多条野外露头剖面观察、125口探井约2 115 m长的岩心精细观察及大量的室内研究工作,并意外发现长7—长9油层组广泛发育深水重力流沉积。这一发现无疑对于研究区今后致密油和页岩油地质研究与勘探具有十分重要的意义,同时对于拗陷型盆地重力流沉积的研究和勘探具有一定启示意义。有鉴于此,本文拟就陕北定边—富县地区长7—长9油层组重力流沉积致密油的富集条件和资源潜力加以分析,并就拗陷型湖盆的勘探范式加以讨论,以期对今后此类盆地的勘探开发工作有所帮助。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个中、新生代盆地叠加在古生代盆地之上的复合盆地。依据现今构造形态,盆地可划分为西缘逆冲带、天环拗陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起和渭北隆起6个一级构造单元,面积约25 × 10⁴ km²。盆地边缘断裂褶皱相对发育,盆内构造则较为简单,其主体伊陕斜坡为一地层倾角不足1°的不对称西倾单斜构造。

盆地沉积盖层主要经历了5个构造—沉积演化阶段,即中—新元古代拗拉谷、早古生代陆表海、晚古生代海—陆过渡、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷。其中,古生代—三叠纪,鄂尔多斯盆地属大华北盆地的一部分^[27-28];中—晚三叠世,秦岭洋最终关闭,华北板块与华南板块完成沿商丹缝合带和勉略缝合带的最终碰撞造山^[29]。受印支运动影响,华北盆地解体,逐渐形成鄂尔多斯盆地:中三叠世纸坊组沉积期,鄂尔多斯盆地开始形成;中—晚三叠世延长组沉积期—早—中侏罗世延安组沉积期是盆地发育的鼎盛时期,至早白垩世末盆地全面抬升;晚白垩世起盆地进入后期改造阶段^[30]。

鼎盛时期的鄂尔多斯盆地,其北部可达黄河断裂,东部到太行山以东的华北平原,西部以桌子山—贺兰山—牛首山—罗山—六盘山为界,南部抵秦岭和桐柏山,此即所谓的“大鄂尔多斯盆地”^[31]。晚三叠世,其

为一大型不对称内陆拗陷型盆地,发育多个沉积—沉降中心,主沉积—沉降中心总体偏南,深湖—半深湖区大致沿环县—华池—铜川—五里川—南召一线呈北西—南东向展布^[32]。轻—重矿物资料分析结果表明,鄂尔多斯盆地延长组沉积期存在东北、西南、东南和西北4大物源体系^[32]。本文研究区就位于延长组沉积期古湖盆的东北侧(图1),主要受东北物源体系控制,其次为东南物源和南部物源。

作为鄂尔多斯盆地最重要的含油层系,延长组在盆地内以北纬38°为界,整体呈北薄、南厚的分布特征,其中北部厚100 ~ 600 m,南部厚700 ~ 1 300 m^[31]。延长组通常划分为5个岩性段、10个油层组。长10油层组沉积期,湖盆开始发育,规模小、湖水浅,主要发育冲积平原、三角洲平原、滨湖和浅湖沉积;进入长9油层组沉积期后,湖盆开始扩张,湖侵规模扩大,以浅湖和三角洲沉积为主,局部发育半深湖沉积;至长9油层组沉积末期,湖侵达到最大,洛川—富县—甘泉—志丹—吴起一带为半深湖—深湖环境,形成了一套厚度可达20 m以上的深湖—半深湖油页岩——李家畔页岩(图1b),成为鄂尔多斯盆地仅次于长7油层组张家滩页岩的优质生油岩;长8油层组沉积期,湖盆有所萎缩,三角洲沉积范围扩大,深湖—半深湖中心区范围缩小,仅限于富县—志丹—吴起一带,沉积了延长组的另一套有效生油岩。长7油层组沉积期,湖盆再次发生大规模扩张,盆地大范围被湖水淹没,深湖区面积显著扩大,形成长轴为北西—南东向的巨型湖盆,其中长7³油层亚组沉积期是延长组沉积期湖盆的全盛期,沉积了鄂尔多斯盆地分布面积和厚度最大、有机质丰度最高、有机质类型最好的优质烃源岩——张家滩页岩(油页岩),其单层厚度最大可达30 m,优质烃源岩分布范围近5 × 10⁴ km²,整个长7油层组有效烃源岩分布面积约10 × 10⁴ km²,烃源岩厚度一般在30 ~ 60 m,最厚可达130 m,生烃中心位于姬塬—华池—正宁一带^[34]。进入长6油层组沉积期,湖盆进入萎缩状态,深湖区范围有所缩小,沉积作用大大加强,三角洲沉积范围明显扩大,是延长组沉积期三角洲建设的高峰期,东北部和西南部三角洲均向湖盆中心推进,尤以盆地东北部和东部三角洲沉积最为发育,形成了多个大型三角洲沉积体。

2 致密油富集条件

2.1 广泛分布的重力流沉积砂岩

鄂尔多斯盆地作为典型的拗陷型湖盆,其延长组

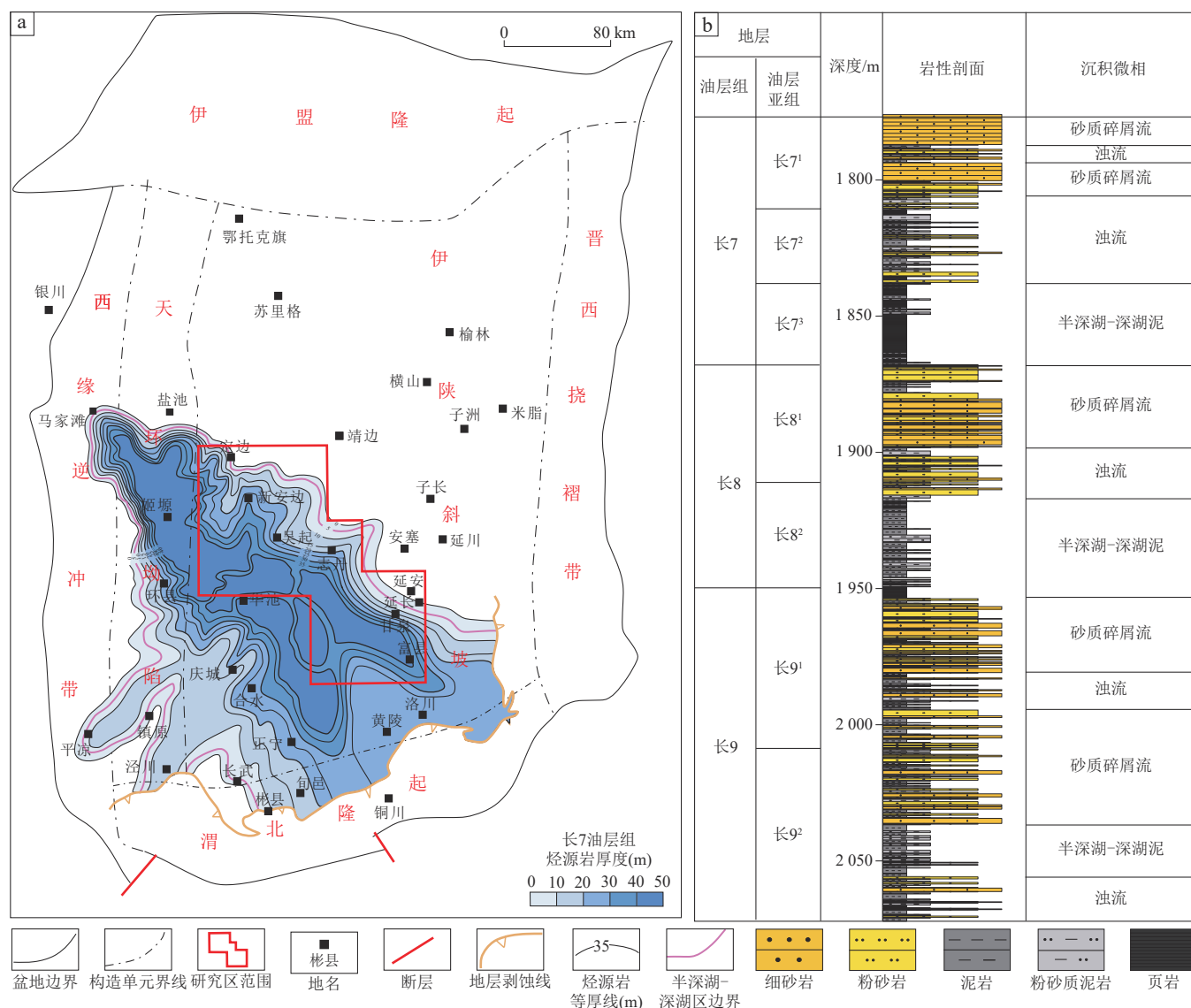


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及延长组综合柱状图

Fig. 1 Map showing the structural unit division (a) and composite stratigraphic column of the Yanchang Formation (b) in the Ordos Basin

a. 盆地构造区划及研究区位置 (据文献[33]修改); b. 研究区地层和油层柱状图

以广泛发育三角洲沉积体系而著称。然而,自20世纪80年代在盆地西南部井下长7油层组发现重力流沉积以来,尤其是进入21世纪后,越来越多的重力流沉积被发现^[35-41]。特别是自砂质碎屑流沉积在延长组被发现^[7-8]以来,有关延长组重力流沉积的研究成果显著增加。但到目前为止,鄂尔多斯盆地延长组中的重力流沉积主要见于西南部和南部地区,层位上多集中在长6和长7油层组,而包括本文研究区在内的陕北地区重力流沉积的报道则较少,且层位同样主要集中于长6和长7油层组^[42-48]。

传统观点认为,鄂尔多斯盆地三叠纪延长组沉积期古湖盆西南翼陡窄、东北翼宽缓,导致西南部以发育扇三角洲、辫状河三角洲和重力流沉积为主,而东北翼

以发育曲流河三角洲为主^[20,49]。这一观点似乎已为以往的勘探实践和地质研究所证明,然而,笔者在对定边—富县地区长7—长9油层组开展岩心观察时,却发现了大量重力流沉积的证据。结合数百口井的粒度分析和大量测井相分析,初步认为研究区重力流沉积分布广泛,且主要存在砂质碎屑流、浊流、滑动—滑塌沉积3种类型,其中以砂质碎屑流沉积分布最为广泛,其次为浊流沉积。

2.1.1 重力流沉积证据

1) 岩心观察证据

基于对研究区内125口探井、总长度约2 115 m的岩心系统观察,研究发现,从东部的富县至西部的定

边,长7—长9油层组广泛发育厚层块状层理砂岩(图2),岩性以细砂岩为主,整体岩性单一,分选较好,无粒序变化,偶见泥岩撕裂屑和泥砾漂浮其中(图2a—c, e, g);单层砂岩厚度较大,通常大于0.5 m,最厚可达数米以上,这些典型特征共同指示了研究区的砂质碎屑流沉积。关于块状层理的成因,前人曾提出过颗粒流、低密度浊流、高密度浊流、砂质碎屑流、弱黏结性碎屑流和超高密度流等认识,但目前多数学者认为其成因主要有两种可能性,即砂质碎屑流和高密度浊流^[12]。Postma等^[50]通过物理模拟实验发现所谓“高密度浊流”实际上可以分为上下两层,底部为层流,顶部为紊流,证实高密度浊流本质上由底部碎屑流和顶部浊流复合构成。按照Shanmugam^[6]的观点,高密度浊流实际上就是砂质碎屑流。因此,块状砂岩应是砂质碎屑

流沉积的标志性特征。鲜本忠等^[51]亦认为块状砂岩的成因以砂质碎屑流沉积为主。除块状层理外,单砂层厚度大(相对于浊流沉积砂岩)也是砂质碎屑流沉积的重要特征之一。李相博等^[8]认为砂质碎屑流沉积的单砂层厚度一般大于0.5 m,最大可达数十米,且横向变化快,与具“复理石”韵律层理的经典浊积岩存在明显区别。

在研究区中,浊流沉积的识别主要依据以下标志:具正粒序结构,底部为突变界面,顶部则为渐变界面,并发育鲍马序列。其中,只有正粒序是最可靠的判别标志^[6]。研究区浊流沉积发育不完整鲍马序列(图2f, h—l),主要为ADE, ADC和CDE段等。每个鲍马序列组合厚度在几厘米至几十厘米不等,在垂向上构成多个韵律层,其中A段岩性主要为细砂岩和粉砂岩,具正

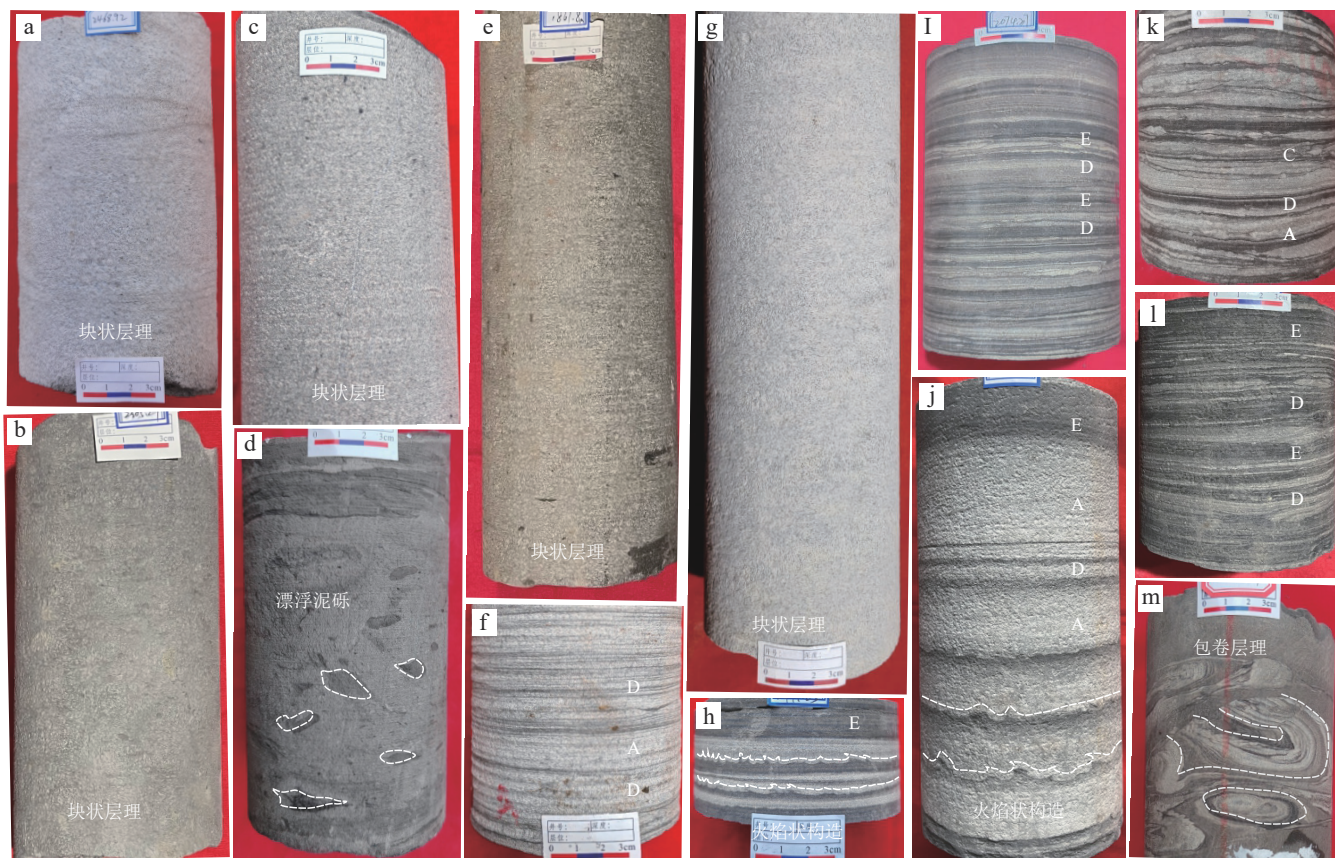


图2 鄂尔多斯盆地定边—富县地区延长组长7—长9油层组重力流沉积岩心照片

Fig. 2 Core photos showing gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 定边, DT3332井, 长9油层组, 块状砂岩, 埋深2 468.92 m; b. 吴起, Z128井, 长8油层组, 块状砂岩, 埋深2 305.29 m; c. 甘泉, X130井, 长7油层组, 块状砂岩, 埋深1 398.87 m; d. 富县, FX191井, 长7油层组, 漂浮泥砾, 埋深1 568.10 m; e. 富县, L271井, 长8油层组, 块状砂岩, 埋深1 861.80 m; f. 甘泉, H70井, 长8油层组, 鲍马序列, 埋深1 337.09 m; g. 志丹, YJ603井, 长8油层组, 块状层理, 埋深1 869.72 m; h. 定边, DT3 703井, 长8油层组, 火焰状构造, 埋深2 499.80 m; i. 吴起, ZC130井, 长7油层组, 鲍马序列, 埋深2 074.37 m; j. 定边, DT48 040井, 长7油层组, 火焰状构造, 埋深2 427.53 m; k. 志丹, YJ358井, 长7油层组, 韵律层理, 埋深1 728.10 m; l. 富县, L230井, 长7油层组, 鲍马序列, 埋深1 789.68 m; m. 富县, L241井, 长7油层组, 包卷层理, 埋深1 560.70 m

(A, B, C, D和E分别为鲍马序列的底部递变层理段、下平行纹层段、沙纹层理段、上平行纹层段和泥岩段。)

粒序(图2j)。此外,还可见火焰状构造(图2h,j)。

滑动-滑塌沉积在研究区的主要识别标志包括发育小型断层、变形构造及包卷层理等(图2m)。

2) 粒度分析证据

根据对449个薄片样品的粒度分析结果,研究区长7—长9油层组重力流沉积以细砂岩为主,其次为粉砂岩。砂质碎屑流沉积粒度略粗于浊流沉积,且分选性稍差。砂质碎屑流沉积砂岩平均粒径 Φ 值范围在3.10~3.37,平均值为3.21;标准偏差为0.45~0.55,平均值为0.48。浊流沉积砂岩平均粒径 Φ 值范围在3.45~3.97,平均值为3.71;标准偏差为0.25~0.42,平均值为0.35。

根据粒度概率累积曲线特征与岩心观察的对比分析认为,以块状层理为特征的砂质碎屑流沉积存在3种概率累积曲线类型:偏粗的短尾两段式、偏粗的一段式和高悬浮组分两段式;而以鲍马序列为特征的浊流沉积主要为偏细的一段式和偏细的短尾两段式(图3)。“偏粗”与“偏细”的判断不仅基于砂质碎屑流沉积的平均值粒径大于浊流沉积,还反映在二者粒度概率累积曲线起始端(粗端)的粒径差异上:砂质碎屑流沉积起始端粒径 Φ 值分布在1.0~3.0,而浊流沉积起始端粒径 Φ 值则介于2.5~3.5。从曲线类型和斜率来看,两类沉积均存在短尾两段式和一段式,但砂质碎屑流沉积的粒径 Φ 值分布范围(1.0~5.0)略宽于浊流沉积(2.5~5.0)。二者的斜率范围分别在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 和 $50^\circ \sim 70^\circ$,表明浊流沉积的分选性略优于砂质碎屑流沉积。

值得关注的是,研究区浊流沉积尤其是砂质碎屑流沉积常见短尾两段式概率累积曲线,其特点是跳跃

次总体占绝对优势(占比 $\geq 95\%$),而悬浮次总体占比极低(普遍 $< 5\%$,甚至不足1%),故名“短尾”。此外,研究区砂质碎屑流沉积还可见高悬浮组分两段式概率累积曲线,其跳跃次总体的占比较低,一般为70%~80%,斜率为 $40^\circ \sim 55^\circ$;悬浮次总体占15%~30%,斜率为 $25^\circ \sim 30^\circ$,这与孙宁亮等^[52]在盆地南部长6—长7油层组所发现的砂质碎屑流沉积概率累积曲线特征一致。

上述两段式概率累积曲线反映出研究区砂质碎屑流和部分浊流沉积兼具重力流和牵引流特征。从流变学特征看,碎屑流属于宾汉塑性体,既表现为重力流,又表现为层状流^[53-54],因此具有重力流与牵引流的双重属性^[12]。另一方面,研究区砂质碎屑流和浊流沉积均表现出粒度较细、分选较好的特点,指示其经历了较长距离的搬运。结合前述两段式概率累积曲线特征以及滑动-滑塌沉积构造的发现,推测研究区重力流沉积主要为三角洲前缘砂体滑塌后向深湖区搬运沉积而成。

由C-M图可以看出(图4),研究区各区块长7—长9油层组砂岩的C值(粒度累积概率曲线上颗粒含量1%处对应的粒径)和M值(粒度累积概率曲线上颗粒含量50%处对应的粒径)均主要平行于C=M基线分布,且分布范围均超出牵引流沉积的QR段,即C值和M值变化范围大,反映为重力流沉积。其中,C值主要分布区间为80.0~600.0 μm ,且呈现自西向东递减的趋势,定边和吴起分布范围最大($C = 80.0 \sim 600.0 \mu\text{m}$),其次为志丹和甘泉地区($C = 80.0 \sim 400.0 \mu\text{m}$),富县地区分布范围最小($C = 80.0 \sim 300.0 \mu\text{m}$);M值主要分布区间为40.0~300.0 μm ,定边最大($M = 40.0 \sim$

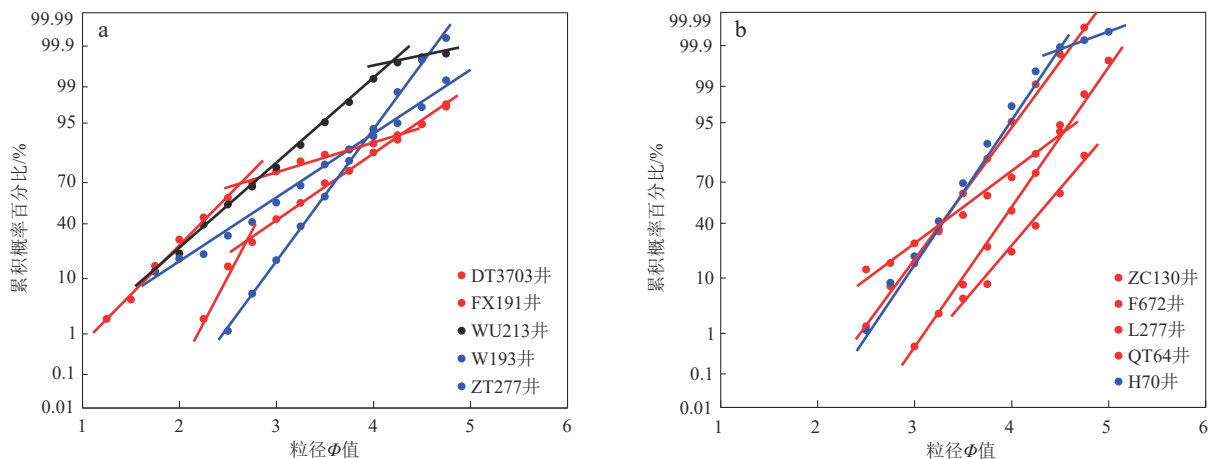


图3 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组砂质碎屑流(a)和浊流(b)沉积粒度累积概率曲线特征

Fig. 3 Characteristics of grain-size cumulative probability curves of sandy debris-flow deposits (a) and turbidity-current deposits (b) in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

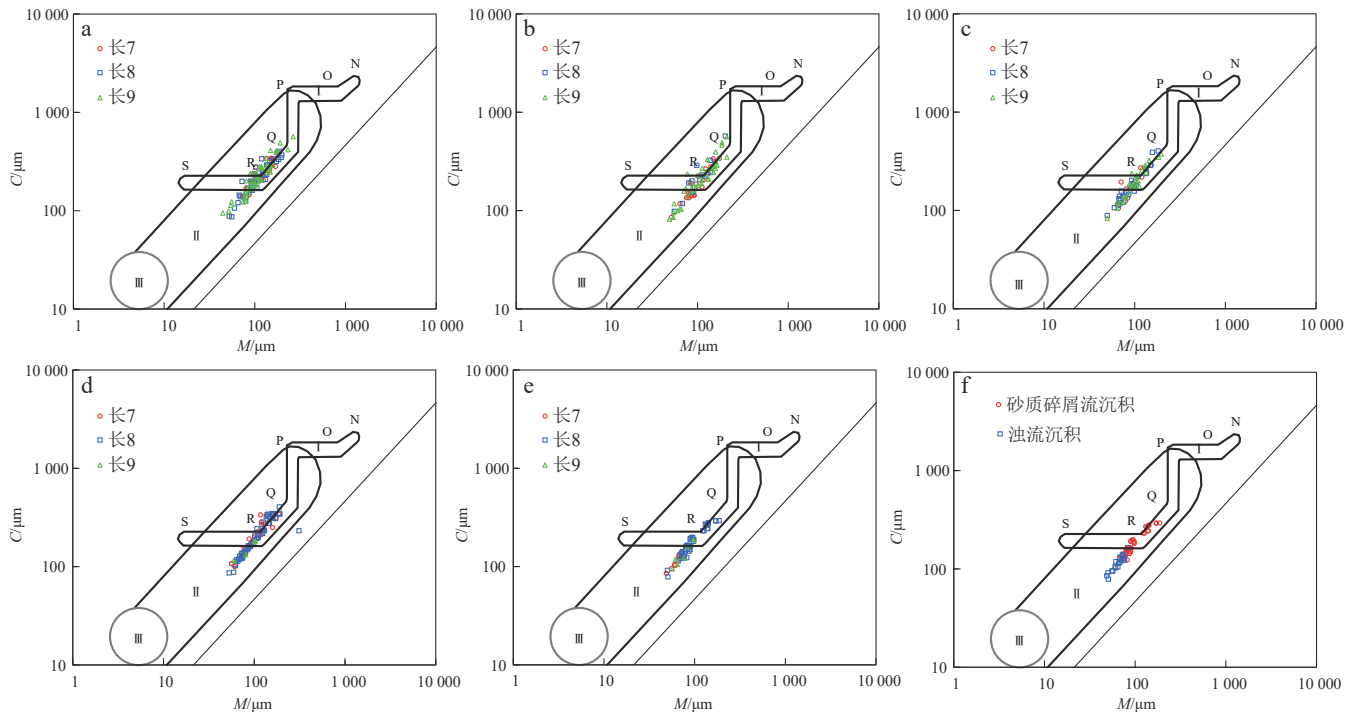


图4 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组重力流沉积C-M图

Fig. 4 C-M diagrams of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a—e. 分别为定边、吴起、志丹、甘泉和富县地区重力流沉积C-M图; f. 富县地区砂质碎屑流和浊流沉积对比

NO段. 滚动搬运; OP段. 滚动搬运为主, 有悬浮搬运; PQ段. 悬浮搬运为主, 少量滚动搬运; QR段. 递变悬浮沉积; RS段. 均匀悬浮沉积; I区. 牵引流沉积; II区. 浊流沉积; III区. 静水悬浮沉积; C. 粒度累积概率曲线上颗粒含量1%处对应的粒径; M. 粒度累积概率曲线上颗粒含量50%处对应的粒径

300.0 μm), 其余地区均在 40.0 ~ 200.0 μm 。C 值和 M 值平行于 $C = M$ 基线的分布模式, 虽然与牵引流的递变悬浮沉积(QS段)相似, 但其 C 值和 M 值变化幅度更大, 是重力流沉积在 C-M 图中的独有特征^[55]。此外, 砂质碎屑流沉积的 C 值和 M 值普遍大于浊流沉积, 前者的平均值分别为 226.8 μm 和 115.3 μm , 后者则分别为 156.8 μm 和 80.7 μm , 这与砂质碎屑流沉积粒径平均值大于浊流沉积的特征一致。

2.1.2 重力流沉积的分布

综合岩心观察、粒度分析、测井相解释及砂/地比数据, 编制了研究区长7—长9油层组沉积相图(图5)。可以看出, 除定边北部等局部地区发育三角洲前缘沉积外, 各油层组中重力流沉积砂体(湖底扇)均广泛分布, 但发育程度存在差异。

长9油层组沉积期, 湖盆处于初始扩张期, 至李家畔页岩沉积时, 湖盆扩张达到最盛。该时期砂体在定边和志丹地区最为发育, 分布面积广、连续性好。定边北部地区以三角洲前缘沉积为主, 而志丹地区则可能为三角洲前缘滑塌形成的大—中型湖底扇与河口坝和席状砂的混合沉积。吴起、甘泉和富县地区砂体发育

程度明显较低, 以小型湖底扇群沉积为主(图5a)。

长8油层组沉积期, 湖盆扩张速率减缓, 晚期三角洲沉积有所增加, 因此长8¹油层亚组砂体总体较长8²油层亚组发育(图5b)。长8²油层亚组沉积期, 除定边北部仍以连续分布的三角洲前缘砂体为主外, 其余地区大多发育小型湖底扇或扇群。长8¹油层亚组砂体以定边北部、吴起西北部和志丹地区最为发育, 具有大面积连片分布特征。其中, 定边北部与吴起西北部可能属三角洲前缘沉积, 志丹地区则推测为滑塌成因的大型湖底扇沉积, 其西北部也可能存在三角洲前缘沉积。其他地区则以分散的小型砂体群为主, 属典型的重力流沉积。

长7油层组沉积期是湖盆扩张的鼎盛时期, 其中长7³油层亚组张家滩页岩沉积期代表了延长组最大湖侵期, 以发育半深湖—深湖泥页岩为主, 砂体发育较差; 而长7²和长7¹油层亚组则广泛发育重力流沉积砂体(图5c)。区域上, 长7²和长7¹油层亚组湖底扇沉积主要分布于定边、志丹、甘泉和富县地区, 在吴起东部和西北部也有局部发育。但这两个层位除定边北部和吴起西北部砂体连片性较好、可能以三角洲前缘沉积为主外, 其余大部分地区均为规模较小、孤立分布的湖底扇或湖底扇群。

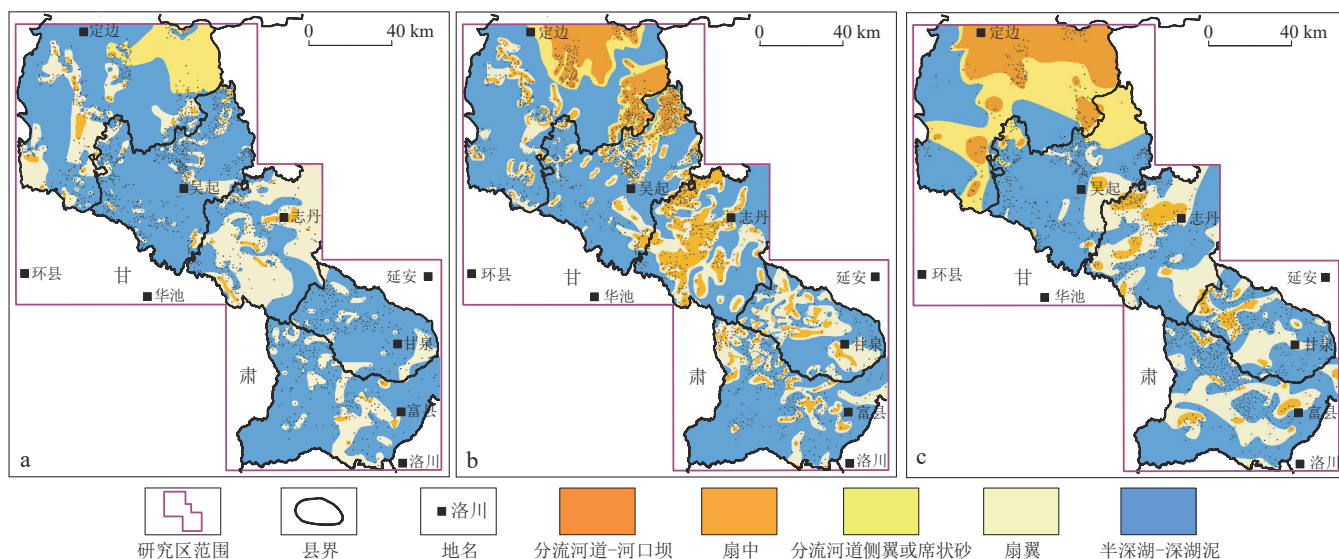


图5 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组沉积相

Fig. 5 Maps showing the distributions of sedimentary facies in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 长9¹油层亚组; b. 长8¹油层亚组; c. 长7¹油层亚组

总体看来,研究区长7—长9各油层组重力流沉积砂体虽发育程度不及三角洲沉积,但其分布仍较为广泛。重力流沉积以非水道型湖底扇沉积为主,水道型重力流沉积不发育,反映研究区重力流沉积主要由三角洲前缘砂体滑塌形成。这类重力流沉积砂体具有分布较广、连片性较好、分选性及物性也较好的特点,为研究区延长组下组合致密油藏的形成提供了良好的储层条件。

2.1.3 重力流沉积形成的地质背景和条件

重力流的形成通常需要具备以下3个条件:①湖盆底床存在由浅水向深水过渡的显著坡度;②充足的物源供给;③一定的触发机制(如重力、洪水、地震、火山活动及暴风浪)。

长期以来,陕北地区在延长组沉积期普遍被认为是宽缓的浅水台地型湖盆。基于这一认识,该区域三角洲沉积发育而重力流沉积不发育被视为必然现象。然而,早在20世纪80年代,梅志超等^[15]就已指出,在志丹—甘泉—宜川一线存在一条明显的盆地底形变化枢纽带。该线东北侧为地形平坦的广阔浅水台地,而西南侧则通过陡坡过渡至深水盆地。梅志超等^[15]所称的枢纽线,实质上即为湖底坡折带,该坡折带向西北可延伸至定边一带,总长度超过280 km。近年来,罗顺社等^[10]、杨哲翰等^[56]对长3—长7油层组湖盆底形的恢复研究也表明甘泉—志丹—吴起—定边一带处于湖盆平缓斜坡向深湖区的过渡区域。傅强与李益^[57]的研究进一步指出,晚三叠世湖盆东北缘发育多级坡折

带,宽度在15~25 km,涵盖了本研究区的部分范围。

由此可见,陕北定边—吴起—志丹—甘泉一线在延长组沉积期存在一条绵延超过280 km的大型湖底坡折带。该坡折带以南,湖盆水体由北部的浅水环境急剧转变为半深湖—深湖环境,为重力流的大规模发育提供了必要的地形条件。在研究区识别出的大面积重力流沉积,又反过来证实了这一大型坡折带的存在。另外,研究区长7—长9各油层组广泛发育优质烃源岩,有机质类型为I型和II₁型,形成于半深湖—深湖环境,也间接证明了研究区砂体的重力流沉积成因。

综上所述,大型坡折带的存在是控制研究区重力流沉积形成的关键,其作用远大于外部触发机制(如地震)。另外,三角洲前缘砂体的持续补给也是重力流沉积形成和砂体发育不可缺少的要素。从这个意义上讲,适度的三角洲建设作用(包括季节性洪水事件)有利于三角洲前缘滑塌成因重力流砂体的形成和广泛分布。

2.2 有效致密储层与优质储层的广泛发育

2.2.1 重力流沉积砂岩储层特征

1) 长7油层组储层特征

根据157个薄片观察结果,长7油层组深水重力流储层岩性以细砂岩和粉—细砂岩为主,碎屑组分中长石类占比最高(平均含量为50.3%),其次为石英(平均含量为25.7%),岩屑占比较少(平均含量为12.0%),填隙物总量平均值约为12.0%。岩石类型以长石砂岩为主,另有少量岩屑长石砂岩。

根据3 000余个物性样品统计结果(表1;图6),研究区长7油层组砂岩属于典型的致密砂岩储层。孔隙度主要分布于4.00%~10.00%,平均值为7.85%;渗透率普遍低于 $0.40\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值为 $0.57\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,中位值为 $0.26\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。其中,长7¹油层亚组物性最好,孔隙度平均值为8.27%,渗透率平均值为 $0.61\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、中位值为 $0.26\times10^{-3}\mu\text{m}^2$;其次为长7²油层亚组,孔隙度平均值为7.50%,渗透率平均值为 $0.49\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、中位值为 $0.26\times10^{-3}\mu\text{m}^2$;长7³油层亚组物性最差,孔隙度平均值为6.70%,渗透率平均值为 $0.49\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、中位值为 $0.22\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

就区域分布而言,长7油层组致密砂岩储层孔隙度总体具有西低东高的变化趋势,而渗透率平均值的变化趋势则相反。但总体而言,长7油层组致密砂岩储层物性在研究区横向上变化不大。相对而言,志丹和富县地区储层物性最好,其次为甘泉和吴起地区,定边地区孔隙度平均值为全区最低(6.70%),但渗透率

平均值较高($0.70\times10^{-3}\mu\text{m}^2$),而中位值不高($0.27\times10^{-3}\mu\text{m}^2$)。

总体而言,研究区长7油层组致密砂岩储层孔隙度平均值与中位值差异不大,而渗透率平均值与中位值差异较大,反映储层渗透率非均质性较强。

2) 长8油层组储层特征

研究区长8油层组砂岩与长7油层组相似,主要为长石砂岩,另有少量岩屑长石砂岩。而且,长8油层组砂岩也是典型的致密砂岩储层,且物性略差于长7油层组(表2)。根据5个区块、2700余个样品的物性分析结果,长8油层组储层孔隙度分布于0.50%~22.70%,平均值为6.40%~8.00%;渗透率分布于 $(0.01\sim101.43)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值为 $(0.22\sim0.52)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,中位值为 $(0.12\sim0.27)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。相对而言,志丹地区储层物性最好,其次为定边地区,然后是富县地区,虽然其孔隙度为全区最高(平均值为8.00%),但渗透率平均值和中位值仅分别为 $0.29\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 和 $0.21\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

表1 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7油层组砂岩储层物性统计

Table 1 Statistics of the porosity and permeability of sandstone reservoirs in the Chang 7 oil group, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

地区	层位	孔隙度/%					渗透率/($10^{-3}\mu\text{m}^2$)				
		样品个数	最小值	最大值	平均值	中位值	样品个数	最小值	最大值	平均值	中位值
定边	长7	308	0.60	24.70	6.70	6.30	286	0.03	35.78	0.70	0.27
吴起	长7	377	0.70	17.80	7.00	6.80	336	0.02	49.39	0.80	0.25
志丹	长7	673	0.57	20.20	7.82	7.80	628	0.01	23.38	0.53	0.30
甘泉	长7	396	0.65	21.90	7.50	7.25	374	0.02	66.20	0.59	0.26
富县	长7	1 843	0.80	22.50	8.40	8.20	1 687	0.01	84.44	0.45	0.35
全区	长7 ¹	2 270	0.60	22.50	8.27	8.10	2 097	0.01	84.44	0.61	0.26
	长7 ²	990	0.57	24.73	7.50	7.20	906	0.01	66.20	0.49	0.26
	长7 ³	337	0.70	20.20	6.70	6.60	308	0.02	24.75	0.49	0.22
	长7	3 597	0.57	24.73	7.90	7.80	3 311	0.01	84.44	0.57	0.26

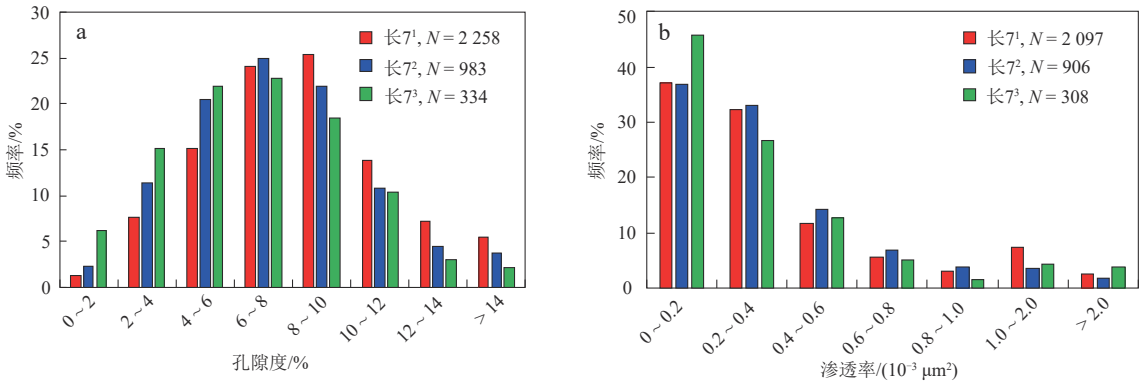


图6 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7油层组砂岩储层孔隙度(a)和渗透率(b)频率分布直方图

Fig. 6 Frequency histograms of the porosity (a) and permeability (b) of sandstone reservoirs in the Chang 7 oil group, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长8油层组砂岩储层物性统计

Table 2 Statistics of the porosity and permeability of sandstone reservoirs in the Chang 8 oil group, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

地区	孔隙度/%				渗透率/(10 ⁻³ μm ²)				样品个数
	最小值	最大值	平均值	中位值	最小值	最大值	平均值	中位值	
定边	2.0	13.5	6.5	6.2	0.04	9.43	0.44	0.27	372
吴起	0.5	12.8	6.4	6.5	0.01	2.24	0.22	0.14	104
志丹	0.9	16.9	7.8	8.4	0.02	21.90	0.45	0.27	765
甘泉	0.5	14.5	7.2	7.0	0.01	101.43	0.52	0.12	765
富县	0.7	22.7	8.0	8.0	0.01	3.28	0.29	0.21	700

甘泉地区长8油层组孔隙度平均值中等,渗透率平均值最大,为 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中位值仅 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,反映其非均质性较强。吴起地区储层物性最差。

3) 长9油层组储层特征

长9油层组砂岩与长8和长7油层组相似,主要为长石砂岩,含少量岩屑长石砂岩。就储层物性来看,长9油层组主体同样属于致密砂岩储层,但其物性总体略优于长7和长8油层组(表3)。根据4个区块、1600余个样品的物性分析结果,长9油层组储层孔隙度为0.20%~17.40%,平均值为5.50%~9.20%;渗透率分布于 $(0.01 \sim 60.89) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,各个区块平均值为 $(0.15 \sim 2.33) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中位值为 $(0.11 \sim 0.64) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层物性由东向西明显变好。定边地区储层品质最好,孔隙度平均值可达9.20%,渗透率平均值和中位值分别为 $2.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,均为全区最大;其次是吴起和志丹地区;富县地区储层孔隙度和渗透率值最低,孔隙度平均值仅5.50%,渗透率平均值和中位值分别为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.2.2 有效储层与良好储层的分布特征

根据录井特别是试油气结果,本文将储层分为非储层、差储层、有效储层和优质储层4类。其中,非储层是指无任何油气显示或试油气结果为干层的储层,差储层是指有油气显示但仅能产出低产油气流(低于工业油气流标准的油气流)的储层,有效储层是指能够

产出工业油气流的储层,优质储层则指的是能够产出高产工业油气流的储层。工业油流标准根据《石油天然气储量估算规范》(DZ/T 0217—2020)并结合研究区实际确定如下:埋深500~1000 m油层的产油量为0.5 t/d,埋深1000~2000 m油层为1.0 t/d,埋深2000~3000 m油层为2.5 t/d。至于高产油流的标准,需根据不同地区、不同埋深及实际的试油结果确定。

据此对研究区长7—长9各油层组进行评价分析,建立了不同层段差储层和有效储层的物性下限标准(图7)。其中长8油层组资料比较丰富,其差储层孔隙度下限值为4.0%,渗透率下限值为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;有效储层孔隙度下限值为6.0%,渗透率下限值为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图7b)。长9油层组差储层孔隙度下限值亦为4.0%,有效储层孔隙度下限值为6.0%,但二者的渗透率下限值均为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图7c)。长7油层组资料较少(图7a),参照长8和长9油层组储层下限标准,确定长7油层组有效储层孔隙度下限值为6.0%,渗透率下限值为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;差储层下限大体与长8和长9油层组相同,亦即孔隙度下限值为4.0%,渗透率下限值暂定为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

考虑到图7中有效储层下限之上还包括一定(甚至较高)比例的高产井,可以判断研究区长7—长9各油层组中的有效储层和优质储层占比均较大。其中长8油层组有效储层和优质储层占比达79.3%,长9油层组占比达85.7%,长7油层组占比可能更大。另外,将

表3 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长9油层组砂岩储层物性统计

Table 3 Statistics of the porosity and permeability of sandstone reservoirs in the Chang 9 oil group, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

地区	孔隙度/%				渗透率/(10 ⁻³ μm ²)				样品个数
	最小值	最大值	平均值	中位值	最小值	最大值	平均值	中位值	
定边	2.0	17.4	9.2	9.1	0.03	68.89	2.33	0.64	750
吴起	0.2	13.4	8.0	7.4	0.01	9.25	0.45	0.26	159
志丹	0.4	13.4	6.2	6.5	0.02	60.91	0.46	0.18	547
富县	0.8	14.6	5.5	4.9	0.01	1.63	0.15	0.11	150

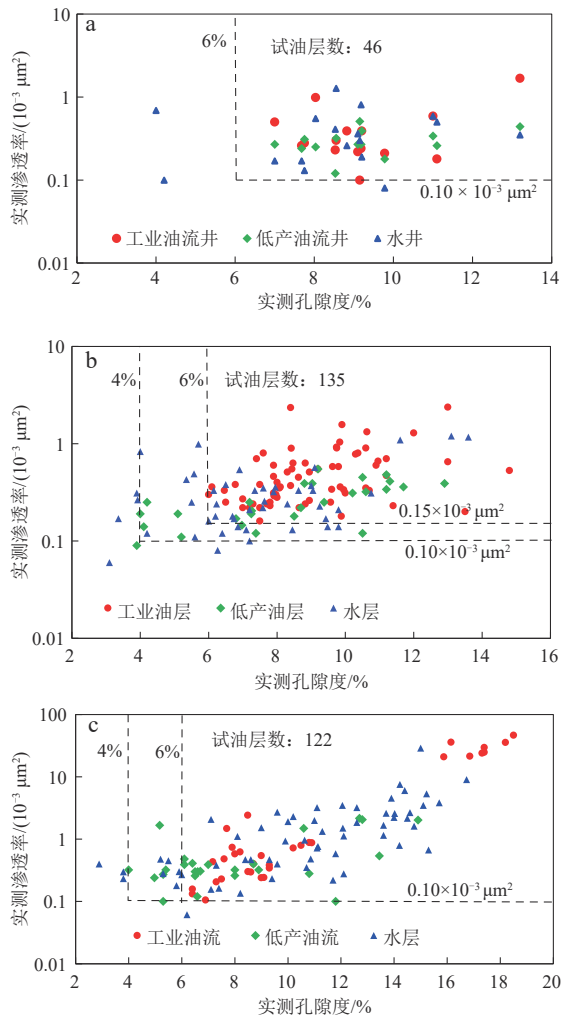


图7 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7(a)、长8(b)和长9(c)油层组储层物性与试油结果对比

Fig. 7 Comparison of the reservoir properties and well test results among the Chang 7, Chang 8, and Chang 9 oil groups in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

上述有效储层下限标准与前文基于大量物性实测数据统计的各层段孔隙度和渗透率平均值和中位值进行对比,亦可见绝大多数储层达到了有效储层标准,说明研究区重力流沉积的致密砂岩储层即使品质差于三角洲

沉积砂岩,但绝大部分储层同样完全能够满足致密油成藏的需要。之所以物性下限较低仍可以成藏,原因就在于这类储层形成于烃源岩发育的半深湖区和深湖区,与烃源岩直接接触,油气无需远距离运移即可成藏,因而烃源岩生烃产生的超压可使生成的油气有足够动力充注于邻近的致密砂岩储层中。

通过对比研究区砂质碎屑流与浊流沉积储层的物性和含油性可以看出(表4;图8),长7—长9各油层组砂质碎屑流沉积储层的物性均明显好于浊流沉积储层。砂质碎屑流沉积储层的孔隙度为1.5%~22.7%,平均值为8.6%;渗透率为 $(0.05 \sim 5.99) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中位值为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。浊流沉积储层的孔隙度为0.8%~13.8%,平均值为5.8%;渗透率为 $(0.02 \sim 5.95) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中位值为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含油饱和度也表现为砂质碎屑流沉积明显优于浊流沉积储层,前者的含油饱和度平均值为58.4%,后者为43.0%。

对比定边、吴起、志丹、甘泉和富县5个地区长7—长9油层组砂质碎屑流与浊流沉积砂岩储层的试油产量可以看出(图9),砂质碎屑流沉积储层试油产量明显较高,各地区平均产油量分别为3.40、3.37、1.79、1.47和2.28 m^3/d ;而浊流沉积储层产量较低,各地区平均产油量分别为0.84、1.72、0.74、0.52和1.12 m^3/d 。试油结果表明,砂质碎屑流沉积储层多数为有效储层和优质储层,部分为差储层,而浊流沉积砂岩虽不乏有效储层和优质储层,但储层条件相对较差。

2.3 多套优质烃源岩与充足的古超压

研究表明,定边—富县地区长7和长9油层组均有优质烃源岩发育,长7油层组的有机质丰度最高,长9油层组顶部的李家畔页岩次之。此外,本次研究还在甘泉—富县一带首次发现了规模分布的长8油层组优质烃源岩^[58]。

表4 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组砂质碎屑流与浊流沉积砂岩物性及含油饱和度对比

Table 4 Comparison of reservoir properties and oil saturation of sandstone reservoirs of sandy debris-flow deposits and turbidity-current deposits in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

参数	孔隙度/%		渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$		原始含油饱和度/%	
	砂质碎屑流沉积	浊流沉积	砂质碎屑流沉积	浊流沉积	砂质碎屑流沉积	浊流沉积
最大值	22.7	13.8	5.99	5.95	87.88	84.6
最小值	1.5	0.8	0.05	0.02	6.97	2.7
平均值	8.6	5.8	0.60	0.37	58.40	43.0
中位值	8.4	5.6	0.34	0.23	60.30	44.0
样品个数	404	304	404	304	311	216

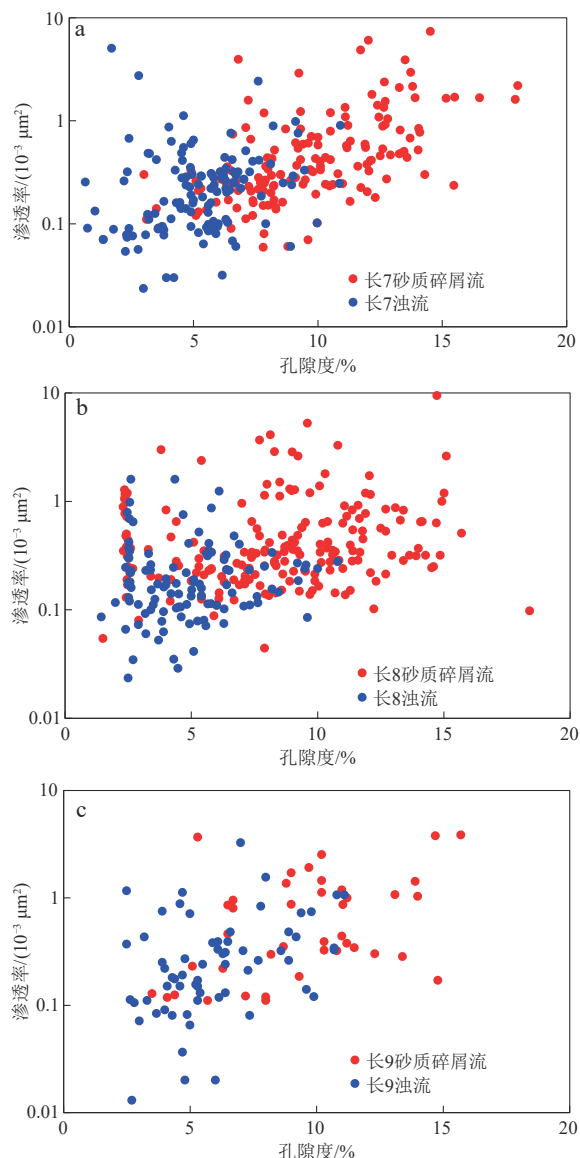


图8 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7(a)、长8(b)和长9(c)油层组砂质碎屑流与浊流沉积储层物性对比

Fig. 8 Comparison of the reservoir properties between sandy debris-flow deposits and turbidity-current deposits from the Chang 7, Chang 8, and Chang 9 oil groups in the Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

2.3.1 烃源岩评价标准

根据55个样品的分析结果,研究区长7油层组烃源岩总有机碳含量(TOC)为1.1%~21.1%,平均值为6.0%;生烃潜量($S_1 + S_2$)为1.9~124.4 mg/g、平均值为21.5 mg/g。其中黑色页岩 TOC 为4.3%~21.1%、平均值为8.6%, $S_1 + S_2$ 为9.0~124.4 mg/g,平均值为34.0 mg/g;暗色泥岩 TOC 为1.1%~5.4%、平均值为3.1%, $S_1 + S_2$ 为1.9~17.0 mg/g、平均值为7.1 mg/g。付金华等^[59]对湖盆中心区长7油层组烃源岩的研究表明,黑色页岩 TOC 主

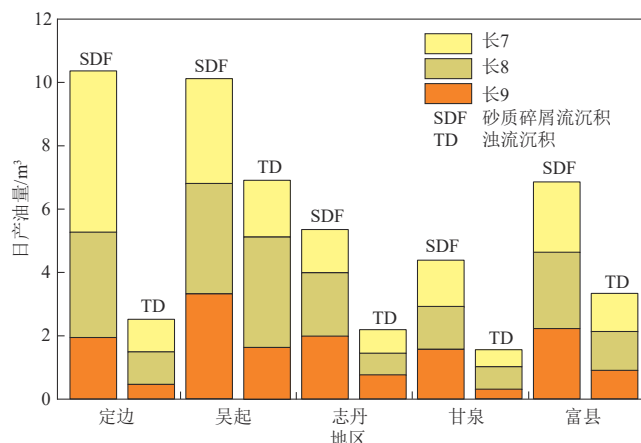


图9 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组砂质碎屑流与浊流沉积砂岩试油产量对比

Fig. 9 Comparison of tested daily oil production of the sandstone reservoirs of sandy debris-flow deposits and turbidity-current deposits in the Chang 7–9 oil groups, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

要分布在6.0%~16.0%,平均值为13.8%;暗色泥岩 TOC 主要分布于2.0%~6.0%,平均值为3.8%。对比可知,研究区长7油层组黑色页岩有机质丰度明显低于湖盆中心区烃源岩,而暗色泥岩略逊于后者。

无论是湖盆中心区还是研究区、黑色页岩还是暗色泥岩,鄂尔多斯盆地长7油层组烃源岩的有机质丰度都很高,而且其有机质类型均为I型和II型。按照石油天然气行业烃源岩评价新标准《烃源岩地球化学评价方法》(SY/T 5735—2019)^[60],鄂尔多斯盆地长7油层组烃源岩几乎全部可归类为好烃源岩($TOC = 1\% \sim 2\%$, $S_1 + S_2 = 6 \sim 20 \text{ mg/g}$)或优质烃源岩($TOC \geq 2\%$, $S_1 + S_2 \geq 20 \text{ mg/g}$),且绝大多数为优质烃源岩。然而,这一评价结论对鄂尔多斯盆地而言明显偏粗,难于有效指导其勘探实践。为此,本文基于鄂尔多斯盆地烃源岩有机质丰度的实际分布特征,提出了一套细化的烃源岩评价标准(表5;图10)。需要说明的是,该标准在 TOC 低于2%的3个级别中, TOC 界限值与行业标准一致,但 $S_1 + S_2$ 界限值根据长7油层组烃源岩样品中 TOC 与 $S_1 + S_2$ 的实际关系进行了调整(图10a)。对于 TOC 大于2%的烃源岩,行业标准将其评价为优质烃源岩,而本文根据鄂尔多斯盆地页岩油含油饱和指数(OSI)与 TOC 的关系将其细分为“很好烃源岩”和“极好烃源岩”两类,前者的 TOC 为4%~6%,后者的 TOC 大于6%,划界的依据是 TOC 为4%是 $OSI = 100 \text{ mg/g}$ (页岩油工业可动下限)时的有机碳含量上限,而 TOC 为6%大体对应 $OSI = 75 \text{ mg/g}$ 左右(页岩油可动下限)。有关上述页岩油可动性的 OSI 界限,将另文讨论。

表5 鄂尔多斯盆地三叠系延长组泥质烃源岩评价标准
Table 5 Criteria for evaluation of argillaceous source rocks of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

烃源岩等级	TOC/%	(S ₁ + S ₂)/(mg/g)
非烃源岩	< 0.5	< 0.5
差烃源岩	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.5
中等烃源岩	1.0 ~ 2.0	1.5 ~ 4.0
好烃源岩	2.0 ~ 4.0	4.0 ~ 10.0
很好烃源岩	4.0 ~ 6.0	10.0 ~ 18.0
极好烃源岩	> 6.0	> 18.0

2.3.2 烃源岩评价

研究区长7油层组烃源岩的中等烃源岩、好烃源岩、很好烃源岩和极好烃源岩均占一定比例,特别是极好烃源岩占比远超长8和长9油层组烃源岩。长8和长9油层组烃源岩均以好烃源岩和很好烃源岩为主,极好烃源岩和中等烃源岩均很少。相比较而言,长9油层组李家畔页岩明显好于长9油层组非李家畔页岩的泥页岩和长8油层组泥页岩(图11),是研究区仅次于长7油层组黑色页岩的一套优质烃源岩。

从区域分布而言,研究区长7油层组烃源岩分布最广,全区均有分布,并以长7³油层亚组张家滩页岩最

为发育,其次为长7¹油层亚组,长7²油层亚组烃源岩发育最差。①长7³油层亚组页岩在研究区内广泛分布,最大厚度可达55 m,平均厚度约15 m。厚度大于10 m的区域主要位于研究区西南部,厚度大于20 m的区域主要分布在定边中南部、吴起中南部、志丹西南部以及富县南部;长7³油层亚组泥岩平均值厚度约6 m,最大厚度可达35 m,主要分布在富县及定边西南部,其次为甘泉和志丹南部;长7³油层亚组粉砂质泥岩平均厚度约9 m,同样在富县地区较为发育,最大厚度可达到34 m以上。②长7¹油层亚组页岩最厚达30 m以上,平均厚度约4 m,以甘泉地区最为发育,厚度普遍在10 ~ 25 m,其次为富县、志丹和定边西部地区,厚度主要分布在5 ~ 20 m;长7¹油层亚组泥岩和粉砂质泥岩主要分布于富县、甘泉、定边和吴起地区,厚度普遍在5 ~ 20 m,志丹地区相对较薄。③长7²油层亚组页岩厚度较大(5 ~ 15 m),主要分布在志丹和吴起东部,其余地区厚度多在5 m以下;泥岩和粉砂质泥岩厚度也较小,普遍在10 m以下(5 m以下居多)。

长9油层组有效烃源岩以往多关注于顶部的李家畔页岩,但实际上整个长9油层组在研究区均不同程度发育有效烃源岩和优质烃源岩(图11c,d)。其中,李家畔页岩有机质丰度最高、有机质类型最好,厚度多

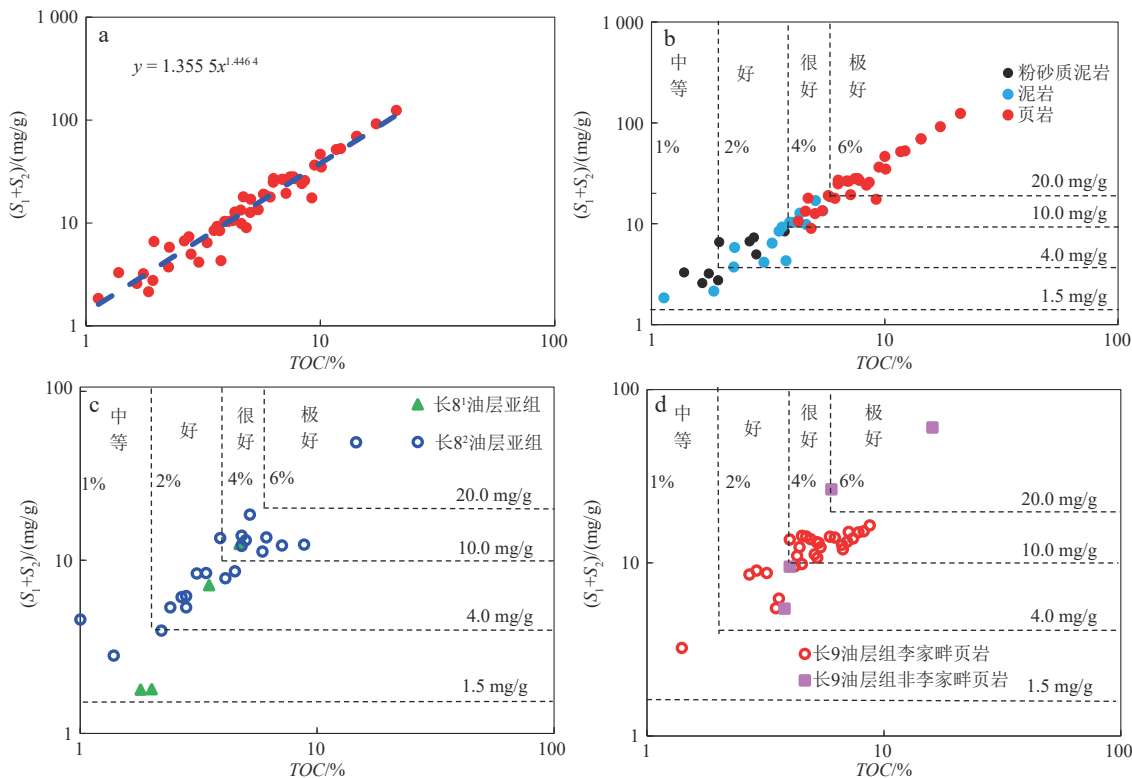


图10 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组烃源岩评价图

Fig. 10 Diagrams showing the evaluation results of source rocks from the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin
a. 长7烃源岩 TOC 与 S₁ + S₂ 关系拟合图; b. 长7烃源岩评价图版; c. 长8烃源岩评价图版; d. 长9烃源岩评价图版

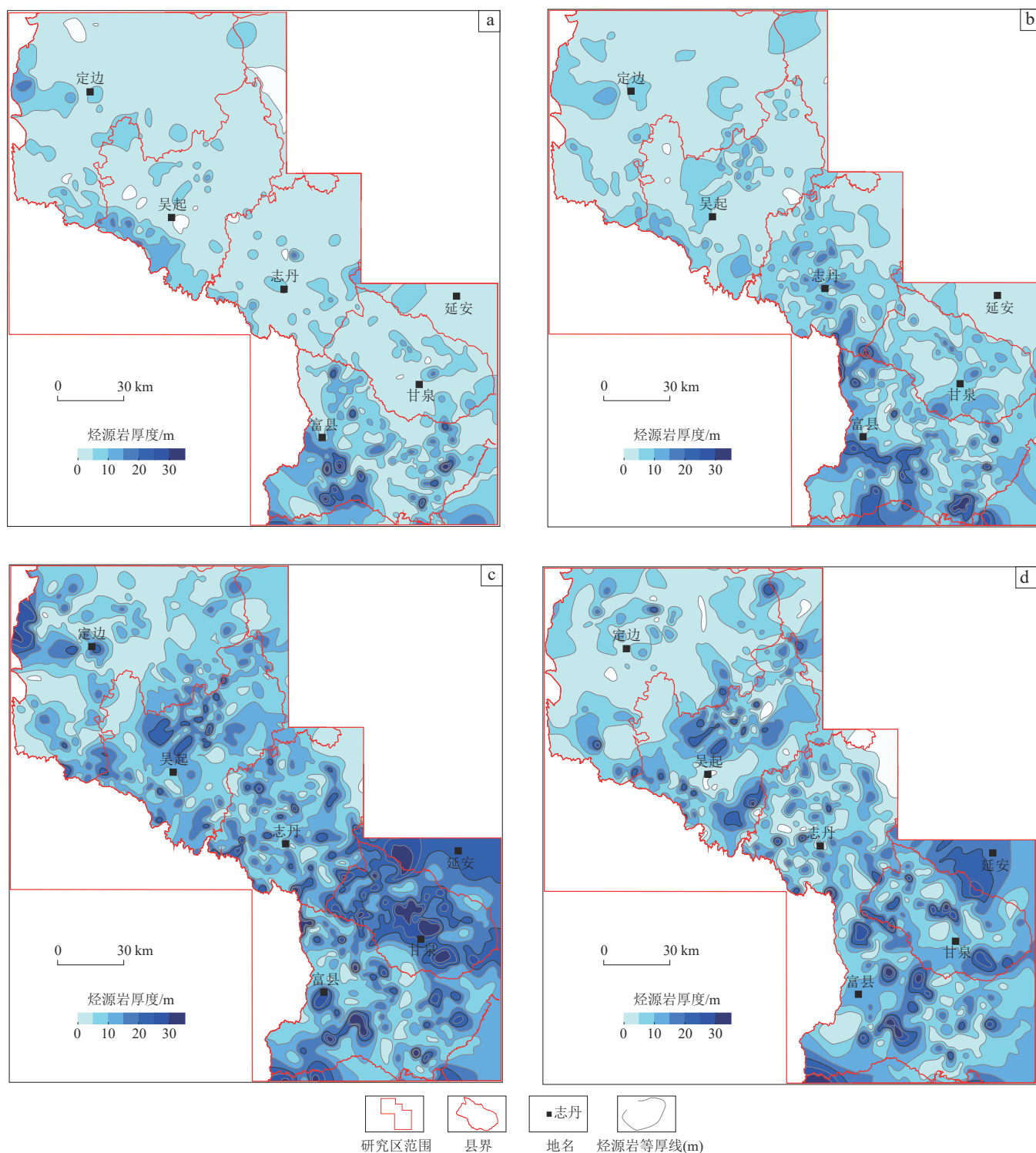


图11 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长8—长9油层组烃源岩(泥岩+页岩)分布等值线图

Fig. 11 Maps showing the distribution of source rocks (mudstones and shales) in the Chang 8-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 长8¹油层亚组; b. 长8²油层亚组; c. 长9¹油层亚组; d. 长9²油层亚组

分布于4.0~17.0 m(平均值为7.5 m),自西北向东南逐渐增大,最厚区位于甘泉、安塞南部和富县北部,甘泉地区最大厚度超过35 m。累计厚度大于10 m的区域面积约为3 574 km²,大于20 m的面积约为704 km²。整个长9¹油层亚组烃源岩以甘泉地区厚度为最大

(10~30 m),其次为富县、志丹和吴起地区,定边地区仅在西部局部发育。长9²油层亚组烃源岩则主要分布于富县、志丹和吴起地区,厚度一般在5~25 m。

长8油层组烃源岩主要分布在长8²油层亚组,长8¹油层亚组相对较差(图11a,b)。长8²油层亚组有效

烃源岩主要分布在志丹、甘泉和富县地区;其顶部烃源岩主要分布在甘泉和富县地区,厚度在10~25 m,单层最大连续厚度大于20 m;底部烃源岩主要分布在富县和志丹地区,厚度在10~25 m,单层最大连续厚度大于30 m。长8¹油层亚组有效烃源岩主要分布在富县地区,吴起西南部和甘泉东北部也有一定发育,累计厚度主要在10~15 m,单层最大连续厚度大于10 m。

2.3.3 古超压的分布

长7、长8和长9油层组3套优质烃源岩在研究区的广泛发育,导致了烃源岩中古超压的形成和普遍分布,为致密油的充注与成藏提供了必要的动力来源。根据致密油储层流体包裹体古超压恢复结果,研究区长7、长8和长9油层组储层的古压力系数普遍在1.21~1.58,各油层组平均值为1.32~1.35;古过剩压力在6.4~16.6 MPa,各油层组平均值为9.0~10.0 MPa。若遵循“致密油藏形成大多早于储层致密化时间”的观点,则烃源岩的古超压强度应该更大。研究区主力烃源岩长7油层组的古压力系数在1.55~2.00,局部甚至超过2.00。如此强大的古超压,为致密油的成藏与富集提供了充足的充注和运移动力,如长9¹油层亚组中的工业油流井和低产油流井就主要分布于长7油层组古压力系数较大的区域(图12)。

2.4 优越的源-储-封结构

鄂尔多斯盆地中生界油藏原油主要来自长7油层组烃源岩。对于长7油层组之上地层,由于烃源岩不发育,控制油气成藏的因素除圈闭外,主要取决于储-盖组合及运移条件。然而,在长7—长9油层组这一“源-储-封”一体化的层段中,烃源岩、储层和封盖层频繁交互或侧向变化,此时除烃源岩和储层品质外,源-储-封三者的空间配置与结构成为控制成藏与富集的关键因素。

根据研究区长7—长9油层组源、储、封的分布及其相互关系,可将源-储-封配置类型分为4类和11种(表6;图13)。其中,源-储侧接型(D类)既可以是源-储同层侧接,也可以是烃源岩生成的油气先侧向运移至附近断裂,再通过断裂向上(源下储上侧接型)或向下(源上储下侧接型)运移,最终在适当的储-盖组合或圈闭中聚集成藏。

研究表明,由于长7³油层亚组张家滩页岩为整个鄂尔多斯盆地(包括研究区)最优的生油岩,同时也是延长组下组合最好的区域盖层,长9油层组顶部李家

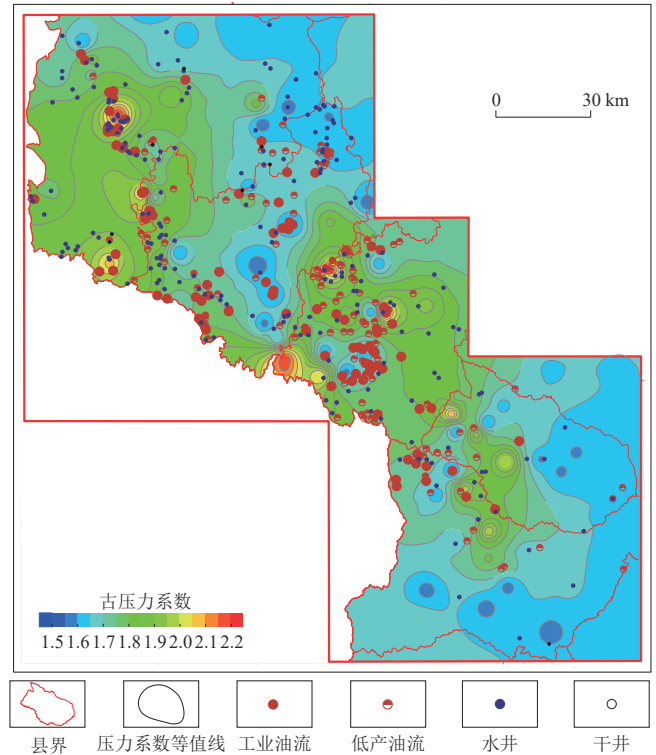


图12 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7油层组烃源岩古压力系数与长9¹油层亚组试油结果对比
Fig. 12 Correlation between the paleo-pressure coefficients of source rocks in the Chang 7 oil group and the well test results of the 1st oil sub-group of the Chang 9 oil group in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

表6 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组源-储-封组合分类及其在延长组下组合中的分布

Table 6 Source rock-reservoir-seal assemblage types of the Chang 7-9 oil groups and their respective distributions in the lower oil play of the Yanchang Formation within the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

类	种	分布层位
源夹储型(A)	源夹储厚层型(A ₁)	长8 ¹ 、长8 ² 油层亚组
	源夹储薄层型(A ₂)	长7 ³ 油层亚组
源上储下型(B)	源上储下直接型(B ₁)	长8 ¹ 、长9 ¹ 油层亚组
	源上储下近源型(B ₂)	长8、长9油层组
	源上储下远源型(B ₃)	长9 ² 油层亚组
源下储上型(C)	源下储上直接型(C ₁)	长7 ² 、长8 ² 油层亚组
	源下储上近源型(C ₂)	长7 ² 油层亚组、长8油层组
	源下储上远源型(C ₃)	长7 ¹ 油层亚组
源-储侧接型(D)	源-储同层侧接型(D ₁)	长9—长7油层组
	源上储下侧接型(D ₂)	长9 ² 油层亚组、长10油层组
	源下储上侧接型(D ₃)	长7 ¹ 油层亚组

畔页岩次之,因此,由这两套烃源岩兼封盖层构成的源夹储型和源上储下型组合无疑是最佳的成藏组合,特别是长7油层组烃源岩构成的源-储-封组合最为有

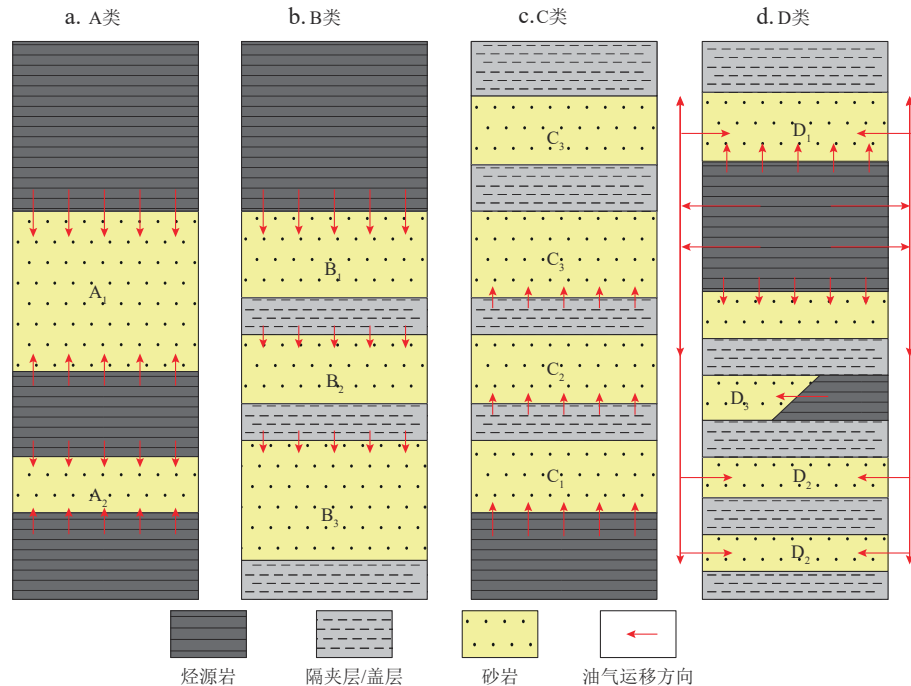


图13 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组源-储-封组合分类剖面示意图

Fig. 13 Schematic diagrams showing the various types of source rock-reservoir-cap rock assemblages in the Chang 7-9 oil groups,

Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

(图中字母代表源-储-封组合类型, 详见表6。)

利,其次是长9与长8油层组内部的源-储组合。值得注意的是,对于以长7³油层亚组为主要烃源岩的长7油层组而言,由于上部最近的区域性盖层为长4+5油层组泥岩,其次为长6油层组内部和底部数层很薄但分布较稳定的斑脱岩层,因此长7³油层亚组张家滩页岩以上层段的油藏富集程度,与其上覆盖层及长7油层组本身的断裂(包括裂缝)发育程度密切相关。当然,由于长7油层组砂岩致密程度较高,也具备一定自封闭能力,因此,在缺乏优质区域盖层但自身裂缝不发育的情况下,仍可以形成较高程度的油气富集。

就区域分布而言,由于烃源岩(封盖层)发育的差异性,研究区以志丹为界,东、西部源-储-封结构明显不同。东部甘泉—富县地区长7—长9油层组烃源岩均较发育(图14),特别是长8和长9油层组烃源岩发育程度明显优于西部,3个层位均具备成藏条件,但源-储-封结构比较复杂,且烃源岩的发育导致储层条件不同程度变差,造成致油气富集程度差异较大。

富县地区长7和长8油层组烃源岩主要分布在南部,且长7油层组烃源岩主要分布在长7³油层亚组,长8油层组烃源岩在长8¹和长8²油层亚组均较发育,造成南部地区长8油层组储层发育较差;而北部长7油层组(特别是长8油层组)烃源岩相对较薄,砂体更发育,

长9油层组烃源岩和储层发育程度中等且侧向变化较大。因而,富县南部以长7¹—长7²油层亚组(源下储上型)和长9油层组(源上储下侧接型)成藏最为有利,北部以长8油层组成藏最为有利,其次为长7和长9油层组。

甘泉地区烃源岩主要分布在长7¹与长9¹油层亚组,长8油层组烃源岩不发育而砂体发育,因此长7²—长7³油层亚组和长8油层组为源夹储型结构,成藏条件十分有利;长9¹油层亚组因烃源岩极为发育导致储层发育较差,油气可能主要富集于长9²油层亚组乃至长10油层组(源上储下型组合)。

位于志丹地区以西的吴起和定边地区除局局部外,长8和长9油层组烃源岩普遍不发育,长7油层组(主要为长7³油层亚组)烃源岩较东部地区更为发育,成为该区主要油气来源,从而对长8和长9油层组储层构成源上储下型结构。由于该区长8油层组减薄,长9油层组较厚且砂体发育,因而长9油层组成为长7油层组以下油气富集的主要层位,其次为长10油层组。需要指出的是,因长9油层组内部泥岩隔夹层较多,来自长7油层组的油气很难直接穿层运移至长9和长10油层组,而可能通过断裂向下运移至长9和长10油层组适当位置,然后侧向运移聚集成藏。因此,西部地区长9和长10油层组可能主

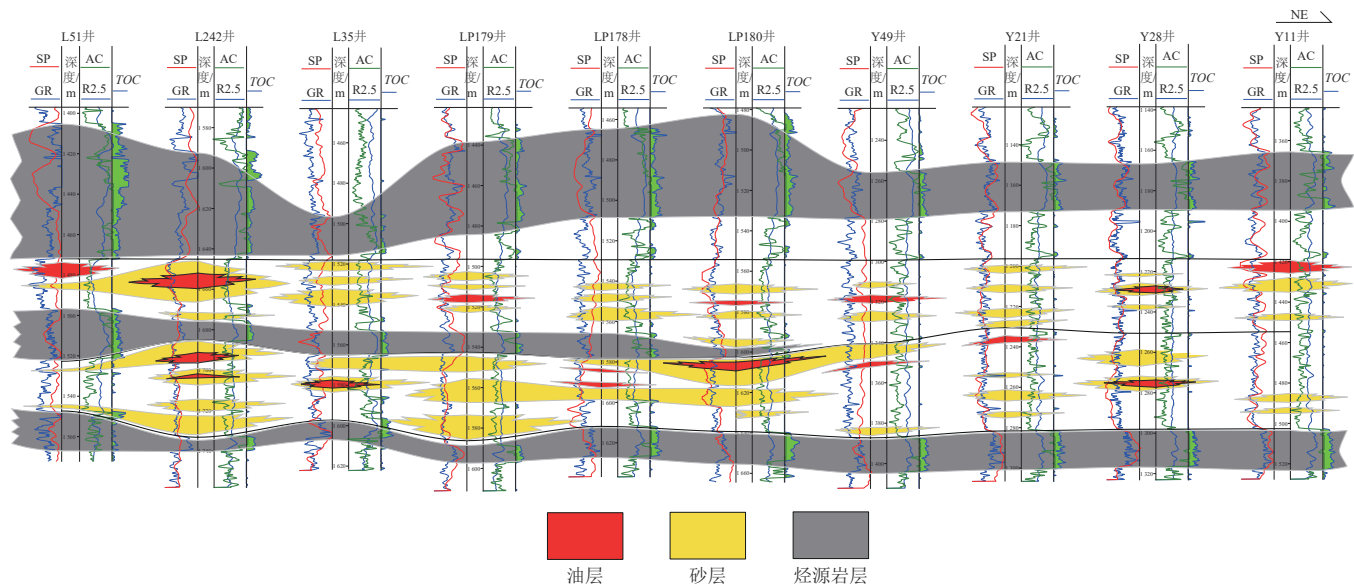


图14 鄂尔多斯盆地富县—甘泉地区长7—长9油层组源-储-封组合分布连井对比剖面

Fig. 14 Well-correlation section showing the distribution of source rock-reservoir-seal assemblages in the Chang 7-9 oil groups in the Fuxian-Ganquan areas, Ordos Basin

要为源上储下侧接型源-储结构。特别是定边地区靠近盆地西缘,断裂相对比较发育,断裂侧接型成藏可能是其重要成藏方式之一。

志丹地区位于研究区东、西结合部,烃源岩主要为长7³油层亚组张家滩页岩,长8和长9油层组烃源岩也有一定程度发育,储层条件较好,因此长7—长9油层组成藏条件优越,源-储-封组合多样,可能是研究区延长组下组合最有利的勘探区域之一。

3 致密油资源潜力与甜点评价

3.1 致密油资源潜力

根据容积法对研究区进行资源评价的结果,预测全区长7—长9油层组砂岩储层的石油地质资源量约为 25.00×10^8 t,可采资源量约为 3.00×10^8 t(表7)。其中,长7油层组石油地质资源量约为 11.69×10^8 t,可采资源量约为 1.40×10^8 t,包括长7¹油层亚组含油面积为2 701.27 km²,资源量为 $61 407.25 \times 10^4$ t;长7²油层亚组含油面积为2 291.98 km²,资源量为 $52 443.17 \times 10^4$ t;长7³油层亚组含油面积为342.54 km²,资源量为 $7 367.54 \times 10^4$ t。长8油层组石油地质资源量约为 10.12×10^8 t,可采资源量约为 1.20×10^8 t,包括长8¹油层亚组含面油积为1 908.57 km²,资源量为 $41 600.80 \times 10^4$ t;长8²油层亚组含油面积为1 822.50 km²,资源量为 $59 632.70 \times$

表7 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组石油地质资源量评价结果

层位	含油面积/km ²	资源量/(10 ⁴ t)	可采资源量/(10 ⁴ t)
长7	5 235.4	116 940.0	14 032.8
长8	3 731.1	101 233.5	12 148.0
长9	1 039.4	32 366.5	3 884.0
合计	10 005.9	250 540.0	30 064.8

10⁴ t。长9油层组含面油积为1 039.40 km²,石油地质资源量约为 3.24×10^8 t,可采资源量约为 0.39×10^8 t,包括长9¹油层亚组资源量为 $24 413.50 \times 10^4$ t,长9²油层亚组资源量为 $7 953.10 \times 10^4$ t。

3.2 致密油甜点评价

甜点评价是致密油气勘探开发中的重点和难点问题之一。其核心目标是有效识别油气富集的高产区域或层段,评价方法需注重实用性,不宜过度复杂。为实现这一目标,关键在于准确表征致密油气的富集程度,并选取合理的评价分类依据和参数。基于此,本文提出一种较实用的甜点评价方法。

首先,引入“富集指数(RF,m)”以定量表征致密油的富集程度。其计算公式为:

$$RF=H\Phi S_o \tag{1}$$

式中:H为有效厚度,m; Φ 为有效孔隙度,%; S_o 为含油饱和度,%。

其次,根据研究区实际产油量分布特征,将单井产量分为低产、中产、高产3个等级,或进一步增加特高产等级,形成4个等级。为排除井深对试油产量的影响,更准确分析地质因素对产能的控制作用,引入“产量指数(PF)”概念,即单位深度(km)的日产油量(t/d)。

甜点评价的关键在于建立研究区内富集指数(RF)与油井产量之间的定量关系(图15),确定不同产量级别所对应的RF阈值(表8)。在此基础上,系统分析影响RF和PF的地质因素,并进行量化表征,从而实现对致密油甜点的分级评价。需要强调的是,源-储-封组合样式是控制长7—长9油层组致密油富集的主要因素之一。因此,甜点评价最好置于所研究地区

源-储-封组合模式的约束下开展,以提高评价的针对性和准确性。

4 拗陷型湖盆石油勘探的范式

中国含油气盆地按其构造性质可分为拉张型、挤压型和过渡型3类^[61]。就中、新生代湖盆而言,常进一步分为断陷型、拗陷型和断-拗过渡型。东部古近纪的渤海湾、南襄、江汉、苏北、南黄海、东海陆架、珠江口、琼东南及北部湾等盆地属于典型的断陷型湖盆,而松辽盆地和鄂尔多斯盆地则属于典型的拗陷型湖盆^[62]。以下就拗陷型湖盆的勘探范式加以讨论。

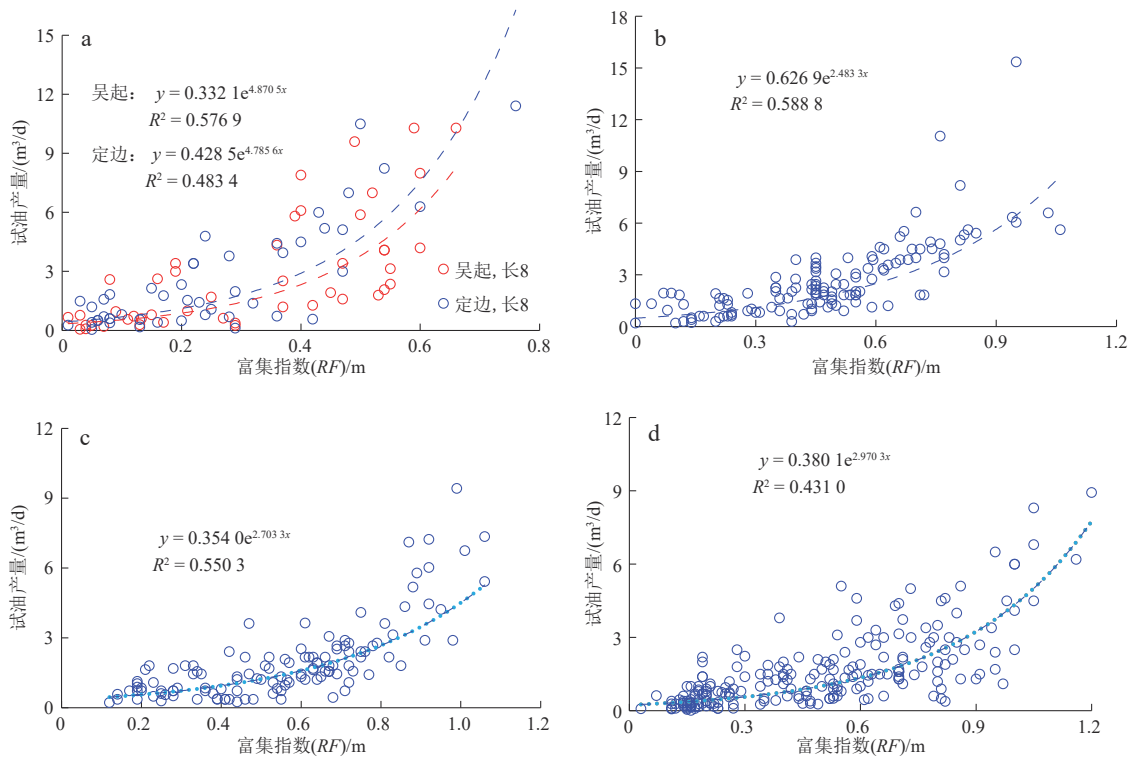


图15 鄂尔多斯盆地定边—富县地区不同区块长8油层组试油产量与富集指数关系

Fig. 15 Cross plots of tested daily oil production vs. EF for the Chang 8 oil group across various blocks in the Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

a. 吴起与定边地区;b. 志丹地区;c. 甘泉地区;d. 富县地区

表8 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长8油层组产量分级与对应富集指数界限

Table 8 Production grades and corresponding EF thresholds of the Chang 8 oil group, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin

地区	中产量/(m³/d)	中产量富集指数/m	高产量/(m³/d)	高产量富集指数/m	特高产量/(m³/d)	特高产量富集指数/m
定边	2.5~5.0	0.37	5.0~8.0	0.51	>8.0	0.61
吴起	2.5~5.0	0.41	5.0~8.0	0.56	>8.0	0.65
志丹	1.0~2.0	0.19	2.0~4.0	0.47	>4.0	0.75
甘泉	1.0~2.0	0.38	2.0~4.0	0.64	>4.0	0.89
富县	1.0~2.0	0.32	2.0~4.0	0.56	>4.0	0.79

4.1 石油勘探的范式转移

所谓油气勘探的范式,主要是指油气勘探的思路以及相应所采取的勘探对策和方法。与世界油气勘探的总体发展趋势一样,中国油气勘探正在经历着6大范式变化:①勘探深度由中-浅层转向深层-超深层;②勘探水深由浅水水域转向深水水域;③勘探资源类型由常规油气藏转向非常规油气藏;④勘探层系由源外转向源内;⑤勘探圈闭由构造圈闭(油气藏)转向岩性圈闭(油气藏);⑥含油气系统研究与勘探由传统含油气系统转向全油气系统。其中,全油气系统将常规油气与非常规油气、源外油气与源内油气、构造油气藏与岩性油气藏等纳入一个统一的整体进行有序化研究和勘探^[63-65],代表了近年来油气地质研究与勘探范式的一次重要演进^[66]。赵靖舟等^[67]将含油气系统分为烃源岩油气系统(SPS)、致密油气系统(TPS)和常规油气系统(CPS)3种类型,并认为其可形成于同一烃源灶或同一盆地,因此强调含油气系统研究与勘探应整体考虑,以实现勘探成效的最大化。

值得注意的是,除上述6大勘探范式变化外,还有一项重要变化目前尚未引起勘探界、尤其是拗陷型盆地勘探界的足够重视,即随着浅水沉积勘探程度的不断提高、勘探难度的日益增大以及深水沉积的不断发现与勘探突破,深水沉积已成为油气勘探特别是石油勘探的一个重要方向,这就要求对石油勘探的范式做出相应调整,将勘探目标由浅水沉积转向深水沉积。

从沉积学角度看,中国油气勘探经历了从20世纪80年代以前以冲积扇及河流相为主到80年代以来以三角洲和扇三角洲沉积为主的勘探历程,并取得了显著成就。但是,随着浅水沉积领域勘探开发进入高成熟阶段,进一步突破的难度日益增大。在此背景下,深水沉积无疑成为未来油气勘探、特别是石油勘探的重要方向。

然而,受传统认识影响,中国深水重力流沉积的研究与勘探一直以东部断陷盆地为主,而松辽和鄂尔多斯盆地等拗陷型盆地则被认为重力流沉积不发育,规模有限,其依据是这类湖盆底形平坦,面积广阔、水体较浅,不利于重力流沉积形成。

的确,自从20世纪60年代重力流沉积理论引进中国以来,东部断陷盆地一直是中国重力流沉积发现最早、分布最广的区域。相比之下,鄂尔多斯、松辽等拗陷型盆地的重力流沉积则发现较少。但近10多年来,

随着油气勘探特别是中、新生代湖盆石油勘探进入近源勘探和源内勘探阶段,越来越多的重力流沉积在拗陷型盆地中得以发现,尤以鄂尔多斯盆地最为显著。松辽盆地自20世纪80年代首次发现重力流沉积以来,近年也陆续发现大规模重力流沉积。如杜锦霞^[68]指出松辽盆地北部青山口组一段和二段湖相泥岩中发育大规模重力流沉积,以滑塌岩型、滑动岩型、砂质碎屑流型和浊积岩型为主;潘树新等^[69]认为松辽盆地齐家—古龙地区白垩系嫩江组一段存在异重流成因的大型水道—湖底扇系统。

实际上,除中国东部伸展背景下的拗陷型盆地(松辽盆地)和中部挤压—伸展过渡背景下的拗陷型盆地(鄂尔多斯盆地)外,西部挤压型盆地也广泛发育重力流沉积,如准噶尔盆地和吐哈盆地上二叠统、库车坳陷上三叠统、柴达木盆地和酒泉盆地东部中-下侏罗统及苏红图—银根盆地下白垩统等均发育重力流沉积^[70];最近,冯有良等^[71]还报道了准噶尔盆地玛湖凹陷风城组的重力流沉积。值得注意的是,所有已发现重力流沉积的拗陷型盆地均在油气勘探中取得重要突破,尤其是鄂尔多斯盆地三叠系延长组,先后发现了白豹地区长6油层组(3~5)亿吨级深水砂岩大油田,以及庆城长7油层组10亿吨级重力流沉积砂岩特大型油田,充分展示了深水重力流沉积良好的勘探前景。

因此,深水重力流沉积无疑将成为鄂尔多斯等拗陷型盆地未来石油勘探的重要领域,这就要求在勘探思路和对策上做出相应调整,加强对深水重力流沉积特征及其勘探对策研究,尽快实现由浅水沉积转向深水沉积的勘探范式改变。事实上,中国东部断陷型湖盆近十多年来的勘探成功,正得益于对重力流沉积的深入研究,从而相继在渤海湾盆地东营凹陷、廊固凹陷、车镇凹陷和沾化凹陷沙河街组,辽河盆地西部凹陷和滩海地区沙河街组,伊通盆地岔路河断陷双阳组等多个盆地或凹陷取得勘探开发较大突破^[13]。

4.2 拗陷型湖盆深水重力流沉积特征与勘探潜力

综合前人研究成果与本文认识,初步分析认为,与断陷盆地重力流沉积及拗陷型湖盆浅水(三角洲)沉积相比,拗陷型湖盆深水重力流沉积主要具有以下石油地质特征。

1) 重力流沉积多由三角洲前缘砂体滑塌产生,因此在一定程度上继承了三角洲前缘砂体的部分沉积特征,往往具有重力流和牵引流的双重特征^[12],并以发

育砂质碎屑流沉积为主,浊流沉积为辅。

2) 砂体分布面积大、连片性较好,通常不发育水道沉积,砂体形态呈连片席状或不规则形态,这一特征明显区别于传统浊流沉积。事实上,自砂质碎屑流概念提出以来,对重力流沉积模式的认识已出现重要突破。与传统的由水道与叶状体构成的浊积扇模式不同,Shanmugam^[53]提出了碎屑流主导的斜坡模式,并将其划分为非水道体系和水道体系2种类型。与浊流形成的水道和叶状体沉积不同,砂质碎屑流在平面上主要形成3种不规则舌状体:孤立舌状体、叠加舌状体和席状舌状体,相应剖面上分别呈孤立透镜状、叠加透镜状和侧向连续席状^[12]。Shanmugam^[53]认为,由于存在滑水机制,水下碎屑流可以沿极缓斜坡长距离搬运。对于鄂尔多斯盆地这种由三角洲前缘砂体滑塌形成的重力流沉积而言,目前多数学者认为其砂体分布面积较大、连片性较好^[72-75],特别是以砂质碎屑流为主的深水沉积砂体厚度大、分布广^[72]。

3) 岩性以细砂岩、粉-细砂岩和粉砂岩为主,整体粒度较细,物性较差,以致密储层为主,是致密油勘探的主要领域之一。相较而言,砂质碎屑流沉积较浊流沉积粒度略粗、物性更好。

4) 油气藏类型以岩性油气藏为主,具“准连续”分布特征^[23-24]。岩性油气藏是当前和今后各类盆地油气增储上产的重要领域^[76],对于拗陷型湖盆深水重力流沉积而言更是主要的勘探目标。

5) 成藏条件优越。重力流砂体往往与深湖-半深湖优质烃源岩直接接触,后者同时还兼具封盖作用,因而成藏概率大,充满度高。特别是砂质碎屑流沉积,不仅厚度大、粒度粗、物性好,其含油饱和度和试油产量也明显高于浊流沉积,是重力流沉积勘探的主要目标。

6) 致密油资源丰富,勘探潜力大^[24, 77-79, 64]。据陶士振等^[78]对中国10个重点盆地致密油资源分级评价结果,致密油总地质资源量为 243.04×10^8 t,技术可采资源量为 18.06×10^8 t,主要分布在鄂尔多斯、松辽、准噶尔和渤海湾盆地。这4个盆地的地质资源量合计达 199.23×10^8 t,技术可采资源量为 14.79×10^8 t,占重点盆地总资源量的82%,显示出拗陷型盆地致密油资源潜力巨大。其中,鄂尔多斯盆地长4+5和长6油层组的致密油资源量为 53.0×10^8 t,长8油层组致密油资源量为 31.2×10^8 t;已探明延长组致密油地质储量为 36.8×10^8 t,待探明储量中长6油层组为 11.0×10^8 t,长8油层组为 9.0×10^8 t^[64]。另据延长油田最新研究

成果,其探区长6和长8油层组致密油地质资源量为 40.54×10^8 t,占探区石油总资源量的49%;已探明致密油地质储量 19.39×10^8 t,占其石油总探明地质储量的54%。上述致密油资源既有浅水沉积,又有重力流沉积。其中,本文研究区定边-富县地区是陕北重力流沉积最发育的地区,致密油资源丰富,勘探潜力大。

综上所述,拗陷型湖盆深水重力流沉积可能比传统认识的更为发育。陕北定边-富县地区长7—长9油层组大规模重力流沉积的发现及其资源评价结果,进一步证明了重力流沉积在拗陷型湖盆分布的广泛性与重要勘探潜力,应引起今后勘探工作的重视。

5 结论与建议

1) 鄂尔多斯盆地陕北定边、吴起、志丹、甘泉、富县一带长7—长9油层组重力流沉积发育,并以砂质碎屑流沉积最为普遍,其次为浊流沉积。

2) 对研究区长7—长9油层组致密油富集条件的分析认为,其烃源岩条件、重力流沉积储层条件以及封盖条件等均十分优越,致密油勘探潜力大,预测石油地质资源量约为 25×10^8 t,以长7和长8油层组为主。

3) 源-储-封组合类型是控制研究区长7—长9油层组致密油成藏和富集的主要因素,其源-储-封组合可划分为4类11种,其中源夹储型、源上储下型,特别是以长7油层组张家滩页岩等优质烃源岩作为源岩的源-储-封组合类型最为有利。

4) 建立了研究区长7—长9油层组差储层和有效储层的下限标准,其中长8和长9油层组差储层的孔隙度下限标准为4%,渗透率下限为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;有效储层的孔隙度下限标准为6%,长8油层组渗透率下限为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而长9油层组仍为 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。长7油层组的差储层标准大体与长8和长9油层组相同,有效储层下限标准与长9油层组大体相同。

5) 建立了适用于鄂尔多斯盆地延长组泥质烃源岩特征的烃源岩评价标准,将泥质烃源岩分为非、差、中等、好、很好和极好烃源岩6个级别。基于新标准评价认为,研究区长7—长9油层组烃源岩均为优质烃源岩,且以长7油层组为最好,其次为长9和长8油层组烃源岩。

6) 提出了基于油井产量分级、富集指数及其地质控制因素分析的甜点评价方法,根据产量分级建立单井产量分级与富集指数的量化关系以及富集指数与甜点影响因素的量化关系,从而实现甜点分级评价。

7) 中国油气勘探正在经历7大范式转变。其中第7大范式转变即由浅水沉积转向深水重力流沉积,是拗陷型湖盆油气勘探应引起重视的一个勘探发展趋势。预测拗陷型湖盆重力流沉积较以往估计的更加发育,且多为滑塌成因,成藏条件优越,特别是砂质碎屑流沉积砂体规模大、物性好,含油性优于浊流沉积,且资源潜力大,应作为今后重力流沉积勘探开发的主要目标。

致谢:感谢长江大学罗顺社教授、中国石油勘探开发研究院陶士振研究员提出建设性意见和建议。为本文相关研究工作提供支持的还有西安石油大学徐泽阳、陈伟涛、张家乐、艾克然木·吾斯曼江、王琳茜、尚松雨、刁豪、李哲、王世雄、沈卫民、向敏、周世琪、孙佳鑫、陈珊珊、张宇轩、张军、李晓龙、丁静静和张龙飞等教师、博士研究生和硕士研究生,特此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. *The Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91-127.
- [2] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 1-168.
- [3] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition [M]//MIDDLETON G V, BOUMA A H. *Turbidites and Deep-Water Sedimentation: Short Course Lecture Notes, Part I*. California: Los Angeles, 1973: 1-38.
- [4] LOWE D R. Sediment gravity flows: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits [M]//DOYLE L J, PILKEY O H. *Geology of Continental Slopes*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1979: 75-82.
- [5] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52(1): 279-297.
- [6] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2-10.
- [7] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.
ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- [8] 李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(4): 19-21.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, WANYAN Rong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(4): 19-21.
- [9] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 10-20.
YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 10-20.
- [10] 罗顺社, 吕奇奇, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积期深水重力流沉积特征及物理模拟实验 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2021: 1-144.
LUO Shunshe, LYU Qiqi, FU Jinhua, et al. Sedimentary characteristics and physical simulation experiments of deep-water gravity flow in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021: 1-144.
- [11] 操应长, 杨田, 王艳忠. 陆相湖盆深水重力流沉积作用 [M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2021: 1-249.
CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong. Deep-water gravity-flow deposition in lacustrine basin [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2021: 1-249.
- [12] 李相博, 刘化清, 杨田, 等. 深水重力流沉积与油气成藏 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2022: 1-190.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, YANG Tian, et al. Deep-water gravity flow and petroleum accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022: 1-190.
- [13] 宋明水, 李存磊, 张金亮. 湖盆深水重力流沉积机理与沉积相模式 [M]. 北京: 科学出版社, 2023: 1-157.
SONG Mingshui, LI Cunlei, ZHANG Jinliang. Mechanism and model for deep-water gravity-flow deposition in lacustrine basins [M]. Beijing: Science Press, 2023: 1-157.
- [14] 李克勤. 陕甘宁盆地晚三叠世的三角洲 [J]. *沉积学报*, 1986, 4(1): 86-95.
LI Keqin. Later Triassic deltas in Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(1): 86-95.
- [15] 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, 326.
MEI Zhichao, PENG Ronghua, YANG Hua, et al. Sedimentary environment of the oil-bearing sand bodies in the Upper Triassic Yanchang Formation of Northern Shaanxi [J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, 9(3): 261-267, 326.
- [16] 李文厚, 庞军刚, 曹红霞, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积体系及岩相古地理演化 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(3): 501-506.
LI Wenhui, PANG Jungang, CAO Hongxia, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the late Triassic Yanchang Stage in Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(3): 501-506.
- [17] 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 reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1985, 12(4): 21-27.

- [18] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志-卷十二-长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1-490.
Changqing Oilfield Petroleum Geology Compilation Team. Petroleum geology records of China-Vol. 12-Changqing Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 1-490.
- [19] 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: 1-228.
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-228.
- [20] 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: 1-390.
HE Zixin. Evolution and petroleum resources of the Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-390.
- [21] 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.
- [22] 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): 1-6.
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): 1-6.
- [23] 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33 (6): 811-827.
ZHAO Jingzhou, BAI Yubin, CAO Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: A new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33 (6): 811-827.
- [24] 赵靖舟, 付金华, 曹青, 等. 致密油气成藏理论与评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 1-538.
ZHAO Jingzhou, FU Jinhua, CAO Qing, et al. Tight oil and gas accumulation and evaluation: geological theories and geophysical technologies [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017: 1-538.
- [25] 付金华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1091-1101.
FU Jinhua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Geological theory and practice of petroleum exploration in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1091-1101.
- [26] 付锁堂, 付金华, 牛小兵, 等. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 777-795.
FU Suotang, FU Jinhua, NIU Xiaobing, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (7) : 777-795.
- [27] 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: 1-394.
ZHANG Kang. Tectonics and resources of Ordos fault- block [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989: 1-394.
- [28] 赵重远, 刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990: 1-189.
ZHAO Chongyuan, LIU Chiyang. Formation of sedimentary basins and hydrocarbon occurrence in the North China Craton [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1990: 1-189.
- [29] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746-768.
ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling orogen [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (5) : 746-768.
- [30] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638.
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 617-638.
- [31] 李文厚, 刘溪, 张倩, 等. 鄂尔多斯盆地中晚三叠世延长组沉积演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 605-621.
LI Wenhui, LIU Xi, ZHANG Qian, et al. Deposition evolution of Middle-Late Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 605-621.
- [32] 刘化清, 李相博, 陈启林, 等. 鄂尔多斯盆地延长组若干石油地质问题分析[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-169.
LIU Huaqing, LI Xiangbo, CHEN Qilin, et al. Analysis of some petroleum geological issues of Yanchang Formation in Ordos Basin [M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-169.
- [33] 刘显阳, 郭雯, 刘江艳, 等. 鄂尔多斯盆地湖盆中部长7₃亚段深水砂质沉积特征及勘探前景[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 279-292.
LIU Xianyang, GUO Wen, LIU Jiangyan, et al. Characteristics and exploration prospects of deep-water sandstone reservoir of Chang 7₃ sub-member, Ordos Basin [J]. Earth Science, 2023, 48 (1): 279-292.
- [34] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [35] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34-44.
FU Jinhua, GUO Zhengquan, DENG Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2005, 7(1): 34-44.
- [36] 陈全红, 李文厚, 郭艳琴, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组浊积岩

- 体系及油气勘探意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 656-663.
- CHEN Quanhong, LI Wenhong, GUO Yanqin, et al. Turbidite systems and the significance of petroleum exploration of Yanchang Formation in the southern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 656-663.
- [37] 卢龙飞, 史基安, 蔡进功, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组浊流沉积及成因模式[J]. 地球学报, 2006, 27(4): 303-309.
- LU Longfei, SHI Ji'an, CAI Jingong, et al. Triassic turbidity current deposit and genetic model of Yanchang Formation of Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(4): 303-309.
- [38] 郑荣才, 文华国, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6油层组湖底滑塌浊积扇沉积特征及其研究意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 566-575.
- ZHENG Rongcai, WEN Huaguo, HAN Yonglin, et al. Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(6): 566-575.
- [39] 夏青松, 田景春. 鄂尔多斯盆地西南部上三叠统长6油层组湖底扇特征[J]. 古地理学报, 2007, 9(1): 33-43.
- XIA Qingsong, TIAN Jingchun. Sedimentary characteristics of sublacustrine fan of the interval 6 of Yanchang Formation of Upper Triassic in southwestern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(1): 33-43.
- [40] 傅强, 吕苗苗, 刘永斗. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆浊积岩发育特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 186-192.
- FU Qiang, LYU Miaomiao, LIU Yongdou. Developmental characteristics of turbidite and its implication on petroleum geology in Late-Triassic Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 186-192.
- [41] 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层组浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 389-394.
- ZHAO Junxing, LI Fengjie, SHEN Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 29(3): 389-394.
- [42] 袁珍, 李文厚, 范萌萌, 等. 深水块状砂岩沉积特征及其成因机制探讨: 以鄂尔多斯盆地东南缘上三叠统长6油层组为例[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 43-49.
- YUAN Zhen, LI Wenhong, FAN Mengmeng, et al. Genetic mechanism and sedimentary features of deep water massive sandstone: A case study of the Upper Triassic sandstones of Chang 6 Formation in the southeast of Ordos Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(4): 43-49.
- [43] 陈飞, 胡光义, 孙立春, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区上三叠统延长组砂质碎屑流沉积特征及其油气勘探意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1042-1052.
- CHEN Fei, HU Guangyi, SUN Lichun, et al. Sedimentary characteristics and the significance of petroleum exploration of sandy debris flows of Yanchang Formation of the Upper Triassic, Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1042-1052.
- [44] 尚婷, 陈刚, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地富黄探区延长组浊流沉积与油气聚集关系[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 81-88.
- SHANG Ting, CHEN Gang, LI Wenhong, et al. Turbidity current deposit and its relation to the hydrocarbon accumulation of Yanchang Formation in Fuhuang exploration area, Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(1): 81-88.
- [45] 李克永, 熊山, 牛斌莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统重力流沉积的主控因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 603-610.
- LI Keyong, XIONG Shan, NIU Binli, et al. The main controlling factors of gravity flow of the Upper Triassic in the southern Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(4): 603-610.
- [46] 尹虎, 屈红军, 孙晓晗, 等. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系长7油层组深水沉积特征及演化规律[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 145-155.
- YIN Hu, QU Hongjun, SUN Xiaohan, et al. Characteristics of deep-water deposits and evolution law of Triassic Chang 7 reservoir in southeastern Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(5): 145-155.
- [47] 张军, 白玉彬, 闫新智, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区长7段深水重力流沉积及勘探意义[J/OL]. 沉积学报: 1-21 [2025-05-29]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- ZHANG Jun, BAI Yubin, YAN Xinzhi, et al. Deep-water gravity flow sedimentation and exploration significance of Chang 7 member in Fuxian area, Ordos Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-21 [2025-05-29]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- [48] 张龙飞, 白玉彬, 闫新智, 等. 吴起一定边地区延长组长7段深水沉积特征及沉积模式[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2025, 40(3): 12-25.
- ZHANG Longfei, BAI Yubin, YAN Xinzhi, et al. Deep-water sedimentary characteristics and sedimentary model of Chang 7 member of Yanchang Formation in Wuqi-Dingbian area [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2025, 40(3): 12-25.
- [49] 陈安宁, 韩永林, 杨飏, 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]//长庆油田勘探开发研究院编. 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 Yang, et al. Geological characteristics of hydrocarbon accumulation and reservoir types in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [C]//Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield.

- Collected Works on Petroleum Exploration and Development in the Ordos Basin (1990–2000). Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 33–46.
- [50] POSTMA G, NEMEC W, KLEINSPEHN K L. Large floating clasts in turbidites: A mechanism for their emplacement [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 58(1): 47–61.
- [51] 鲜本忠, 万锦峰, 董艳蕾, 等. 湖相深水块状砂岩特征、成因及发育模式——以南堡凹陷东营组为例[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3287–3299.
- XIAN Benzong, WAN Jinfeng, DONG Yanlei, et al. Sedimentary characteristics, origin and model of lacustrine deep-water massive sandstone: An example from Dongying Formation in Nanpu depression [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3287–3299.
- [52] 孙宁亮, 钟建华, 王书宝, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组深水重力流沉积特征及其石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2017, 19(2): 299–314.
- SUN Ningliang, ZHONG Jianhua, WANG Shubao, et al. Sedimentary characteristics and petroleum geologic significance of deep-water gravity flow of the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2017, 19(2): 299–314.
- [53] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285–342.
- [54] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58(3/4): 311–341.
- [55] 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 5版. 北京: 石油工业出版社, 2020: 66–82.
- ZHU Xiaomin. *Sedimentary petrology* [M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020: 66–82.
- [56] 杨哲翰, 刘江艳, 吕奇奇, 等. 古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 146–158.
- YANG Zhehan, LIU Jiangyan, LYU Qiqi, et al. Paleogeomorphological restoration and its control on gravity flow sand bodies: A case study of the Chang 7₃ submember of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 146–158.
- [57] 傅强, 李益. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组长6期湖盆坡折带特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 294–298.
- FU Qiang, LI Yi. Characteristics of slope breaks and its implication on petroleum geology in Yanchang Formation Chang 6 (Late-Triassic) of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 294–298.
- [58] 曹磊, 闫新智, 吴伟涛, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长8与长9油层组烃源岩地球化学特征、分布及页岩油资源潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(5): 1410–1429.
- CAO Lei, YAN Xinzhi, WU Weitao, et al. Geochemical characteristics, distribution, and shale oil resource potential of hydrocarbon source rocks in the Chang 8 and Chang 9 members of the Shanbei area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(5): 1410–1429.
- [59] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- [60] 国家能源局. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735–2019 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2019: 1–6.
- National Energy Administration. *Geochemical method for source rock evaluation: SY/T 5735–2019* [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 1–6.
- [61] 李德生. 中国含油气盆地的构造类型[J]. *石油学报*, 1982, 3(3): 1–12.
- LI Desheng. Tectonic types of petroliferous basins in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(3): 1–12.
- [62] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1–484.
- WU Chongjun, XUE Shuhao. *Sedimentology of China petroliferous basins* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 1–484.
- [63] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 679–691.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 679–691.
- [64] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统中的致密油气: 成藏机理、富集规律与资源前景[J]. *石油学报*, 2025, 46(1): 1–16, 47.
- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Tight oil and gas in whole petroleum system: Accumulation mechanism, enrichment regularity, and resource prospect [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(1): 1–16, 47.
- [65] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩, 等. 全油气系统的4种基本类型及其资源开发领域[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(4): 1019–1038.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan, et al. Four basic types of whole petroleum systems and their major plays [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(4): 1019–1038.
- [66] 刘可禹, 张思佳, 刘建良, 等. 全油气系统: 油气地质学研究新方向和油气勘探新范式[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(4): 1055–1070.
- LIU Keyu, ZHANG Sijia, LIU Jianliang, et al. The whole petroleum system: An emerging direction for petroleum geology and an innovative paradigm for oil and gas exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(4): 1055–1070.
- [67] ZHAO Jingzhou, LI Jun, WU Weitao, et al. The petroleum system: A new classification scheme based on reservoir qualities [J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(2): 229–251.
- [68] 杜锦霞. 松辽盆地北部青山口组重力流特征研究及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 385–393.

- DU Jinxia. Characteristics of gravity flow sediment and its geologic significance in Northern Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 385–393.
- [69] 潘树新, 刘化清, ZAVALA C, 等. 大型坳陷湖盆异重流成因的水道—湖底扇系统——以松辽盆地白垩系嫩江组一段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(6): 860–870.
- PAN Shuxin, LIU Huaqing, ZAVALA C, et al. Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 860–870.
- [70] 李文厚, 魏红红, 邵磊, 等. 西北地区湖相浊流沉积[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(1): 57–62.
- LI Wenhou, WEI Honghong, SHAO Lei, et al. Turbidity current deposits of lake facies in northwestern China [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2001, 31(1): 57–62.
- [71] 冯有良, 杨智, 张洪, 等. 咸化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义——以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 839–863.
- FENG Youliang, YANG Zhi, ZHANG Hong, et al. Fine-grained gravity flow sedimentary features and their petroleum significance within saline lacustrine basins: A case study of the Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 839–863.
- [72] 李相博, 付金华, 陈启林, 等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 286–294.
- LI Xiangbo, FU Jinhua, CHEN Qilin, et al. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 286–294.
- [73] 吕奇奇, 辛红刚, 王林, 等. 鄂尔多斯盆地宁县地区三叠系延长组7段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 823–840.
- LYU Qiqi, XIN Honggang, WANG Lin, et al. Sedimentary types, characteristics and model of lacustrine fine-grained gravity flow in the Member 7 of Trassic Yanchang Formation in Ningxian area, Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 823–840.
- [74] 王岚, 王秀娟, 李文厚, 等. 陆相坳陷湖盆深水重力流沉积类型、模式及控制因素分析——以鄂尔多斯盆地延长组长7段为例[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 1091–1103.
- WANG Lan, WANG Xiujuan, LI Wenhou, et al. Analysis of sedimentary types, patterns, and controlling factors of deep-water gravity flow in terrestrial depression lake basins: Takeing Chang 7 member of Yanchang Formation of Ordos Basin as an example [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 1091–1103.
- [75] 刘策, 于炳松, 蒋锐, 等. 湖盆重力流沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地及滦平盆地为例[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5): 133–142.
- LIU Ce, YU Bingsong, JIANG Rui, et al. Sedimentary feature and mode of gravity flow in lacustrine basin: Example from Ordos Basin and Luanping Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 133–142.
- [76] 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 等. 中国岩性油气藏区带类型、地质特征与勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 863–872, 939.
- TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, HOU Lianhua, et al. Play types, geologic characteristics and exploration domains of lithological reservoirs in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 863–872, 939.
- [77] 赵靖舟, 李军, 曹青, 等. 论致密大油气田成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 573–583.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, CAO Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 573–583.
- [78] 陶士振, 胡素云, 王建, 等. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1222–1239.
- TAO Shizhen, HU Suyun, WANG Jian, et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1222–1239.
- [79] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 327–340.
- ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 327–340.

(编辑 张玉银)