



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目: 鄂尔多斯盆地陇东地区长₇亚段源储结构与石油赋存关系研究
作者: 成铭, 陈冬霞, 雷文智, 姚东升, 王福伟, 解广杰
收稿日期: 2022-11-10
网络首发日期: 2023-05-12
引用格式: 成铭, 陈冬霞, 雷文智, 姚东升, 王福伟, 解广杰. 鄂尔多斯盆地陇东地区长₇亚段源储结构与石油赋存关系研究[J/OL]. 地球科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20230511.1806.012.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2023.085

鄂尔多斯盆地陇东地区长7₁亚段源储结构与石油赋存关系研究

成铭^{1,2}, 陈冬霞^{1,2}, 雷文智^{1,2}, 姚东升^{1,2}, 王福伟^{1,2}, 解广杰^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京), 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京), 地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 为推进鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油勘探, 依托砂地比、岩石热解、生烃热模拟试验和测井、录井数据系统划分长7₁亚段源储结构, 分析不同源储结构的烃源岩差异, 探究其烃源岩对致密砂岩含油性的影响。结果表明, 研究区主要发育源夹储型、源储互层型和储夹源型3类源储结构。由于生油母质的差异, 页岩比泥岩具有更优的生排烃能力, 源夹储型具有最好的自源供烃条件, 其次为源储互层型与储夹源型。源储结构中砂体的含油性主要受控于烃源岩品质与储层物性的耦合关系, 源储互层中的优质储层、中等品质源岩与二者互层关系, 使其含油性较高且稳定, 储夹源型中优质砂体与较差源岩的耦合导致了其含油性次之, 而源夹储型中的差储层限制了其含油性。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 致密砂岩; 源储结构; 源岩生排烃能力; 含油性差异

中图分类号: P618.13

收稿日期: 2022-11-10

The difference of source rocks in source-reservoir structure of tight sandstones of Chang 7₁ submember and its influence on hydrocarbon enrichment, Longdong area, Ordos Basin

CHENG Ming^{1,2}, CHEN Dongxia^{1,2}, LEI Wenzhi^{1,2}, YAO Dongsheng^{1,2}, WANG Fuwei^{1,2}, XIE Guangjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;)

Abstract: The Member 7 in the Longdong area of the Ordos Basin mainly develops semi-deep lacustrine-deep lacustrine shale, which is an important exploration strata for tight oil. Based on the sand-ground ratio and lithologic thickness, the source-reservoir structures of submember 7₁ were systematically divided. Based on the rock pyrolysis, hydrocarbon generation thermal simulation and logging data, the source rocks' differences of different source-reservoir structures of submember 7₁ were evaluated, and the influence of source rocks on the oil bearing of tight sandstone was explored. The results show that the submember 7₁ of Yanchang Formation can be divided into three types of primary source reservoir structures, namely reservoir sandwiching source (Type 1), source reservoir interbedding (Type 2), and source sandwiching reservoir (Type 3). The black shale has better hydrocarbon generation and expulsion ability than the dark mudstone, which leads to the Type 3 structure with high source-land ratio has the best Hydrocarbon generation and expulsion, followed by the Type 2 structure and Type 1 structure. The oil bearing of tight sand in different source-reservoir structure is mainly controlled by the coupling relationship between source rock quality and reservoir physical properties. The high quality reservoir and medium quality source rock in Type 2 structure make it have stable and high oil-bearing. For the type 1 structure, the coupling between the high property sand bodies (>6%) and the adjacent poor source rocks results in the large variation of oil saturation

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-02-01-03): 鄂尔多斯盆地致密油-页岩油富集与预测

作者简介: 成铭(1998—), 女, 硕士研究生, 从事油气藏形成机理与分布规律研究。E-mail: cm3339305966@163.com, ORCID: 0000-0001-8891-9940.

通讯作者: 陈冬霞(1974—), 女, 教授, 博士, 主要从事油气藏形成机理与分布规律方面的教学和科研工作。E-mail: Lindachen@cup.edu.cn

(13%~53%)。The poor properties of the Type 3 structure's reservoir limit oil enrichment.

Key words: Ordos Basin; tight sandstone; source-reservoir structure; hydrocarbon supply capacity; oil-bearing differences

引言

致密油是全球非常规油气勘探开发的一大热点, 全球约有 66 个盆地赋存有致密油, 自美国在阿纳达科盆、Niobrara、二叠盆地地区成功开发后, 美国原油产量飙升, 2020 月 12 月美国致密油产量达到 $700.7 \times 10^4 \text{ bbl/d}$ (周庆凡, 2021; Johnstone B, 2007)。中国致密砂岩石油资源量丰富, 勘探潜力巨大, 同时中国重视致密油的成藏理论研究以及勘探开发实践工作, 自 20 世纪 60~70 年代以来, 在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、四川盆地中-下侏罗统, 松辽盆地白垩系青山口组—泉头组等层系发现了大量致密油资源 (贾承造等, 2012; 邓继新等, 2015; 孙龙德等, 2019; 罗群等, 2022; 邹才能等, 2022)。其中鄂尔多斯盆地资源量巨大 (付金华等, 2015), 延长组长 7 段的规模储量可达 $30 \times 10^8 \text{ t} \sim 50 \times 10^8 \text{ t}$, 远景资源量约为 $100 \times 10^8 \text{ t}$ (付金华等, 2021)。

鄂尔多斯盆地延长组是国内第一个成熟致密砂岩油区, 2021 年庆城油田长 7 油层组产油量达到 $131.6 \times 10^4 \text{ t}$ (付金华等, 2022)。三叠系延长组长 7 段属于湖相沉积体系, 泥、页岩分布广、埋深和厚度适中、类型丰度较好, 为常规油气及非常规油气提供了充足的油气来源 (霍萍萍, 2021; 崔景伟, 2019), 湖盆中广泛发育的浊积砂岩为油气的聚集提供了良好的场所, 被视为重要的勘探层系 (付金华等, 2015; 方欣欣等, 2020; 姚涇利等, 2013)。前人总结出长 7 段致密油富集的控制因素包括: 广覆式优质烃源岩、优质砂岩储集体、构造微裂缝和稳定的保存条件 (杨华等, 2017)。但由于长 7 段古湖泊湖水周期性升降频繁, 烃源岩和砂岩储层非均质性均较强, 接触方式复杂多变 (姚涇利等, 2013; 姚涇利等, 2019; 钟高润等, 2016), 导致层段内致密砂岩中油气的充注过程和富集规律需要深入细致的研究。因此, 源储结构这一地质概念的引入, 为细致解剖致密油充注机理提供了有效的手段。鉴于长 7 段砂泥岩相互叠置、源储一体的特征, 前人依据源储厚度关系划分了源夹储型、源储互层型与储夹源型 3 种源储结构类 (姚涇利等, 2019; 钟高润等, 2016; 何浩男等, 2019), 但在源储结构划分方案中选取的参数并未量化。致密砂岩含油性受到烃源岩生烃能力约束 (付金华等, 2020), 长 7 段致密砂岩石油高富集区与烃源岩厚度和生烃强度分布之间具有一致性 (杨华等, 2013)。然而, 宏观上的分析评价会忽视长 7_{1-2} 亚段内部泥页岩对含油性的影响。前人针对致密砂岩储集层特征与油气富集之间的关系也进行了相应的探讨 (刘显阳等, 2023)。但是, 不同源储结构中烃源岩与储集层耦合控制下的含油性差异缺乏相应的系统研究。并且, 源储结构中不同烃源岩类型使得“源储共生”的致密砂岩含油性特征更加复杂 (方欣欣等, 2020; 范柏江等, 2020)。

长 7 段致密砂岩中的油气主要来源于长 7_3 亚段的厚层泥页岩, 但长 7_{1+2} 亚段中大量的浊流砂体与四周的湖相泥岩紧密接触, 因此临近的泥页岩对致密砂岩中油气的聚集也具有贡献。并且, 长 7_1 亚段砂体中构造裂缝发育程度较低 (杨华等, 2017), 致密砂体与下部长 7_3 亚段泥页岩存在一定距离, 因此, 长 7_1 亚段的致密砂岩的主要贡献是自身源储结构中源岩的供给, 可作为分析源储结构中烃源岩差异对含油性控制作用的理想研究层段。本次研究依据烃源岩与储层的接触关系以及砂地比对鄂尔多斯盆地陇东地区长 7_1 亚段的源储结构进行划分, 并探究其烃源岩特征, 总结不同源储结构中烃源岩的差异以及源储耦合对致密砂岩含油性的影响, 为下一步鄂尔多斯盆地非常规油气的勘探开发提供科学依据。

1. 区域地质概况

鄂尔多斯盆地由伊盟隆起、西缘冲断带等 6 个构造单元组成, 是我国陆相第二大沉积盆地。陇东地区分布在以庆城为中心, 北至华池, 南至宁县, 西至镇原附近 (图 1a)。中三叠世延长组长 7 段是湖盆发育鼎盛期, 属于半深湖—深湖的沉积环境, 主要发育碎屑岩储层, 研究区致密油主要发育于延长组 6 段—8 段下部半深湖—深湖相带的重力流、三角洲前缘末端沉积地层的致密储集层中, 储层多与页岩、泥岩共存 (王福伟等, 2022)。

长 7 段为鄂尔多斯盆地延长组的主要的烃源岩层段, 主要分为上、中、下甜点段, 其中上甜点段, 即

长7₁亚段致密砂岩发育,同时还发育泥页岩(图1b)。由于湖水频繁升降,长7₁段的烃源岩与储层在纵向上的组合关系复杂(姚泾利等,2019),源储结构的划分不明确,而不同源储结构烃源岩差异也会影响储层含油性。

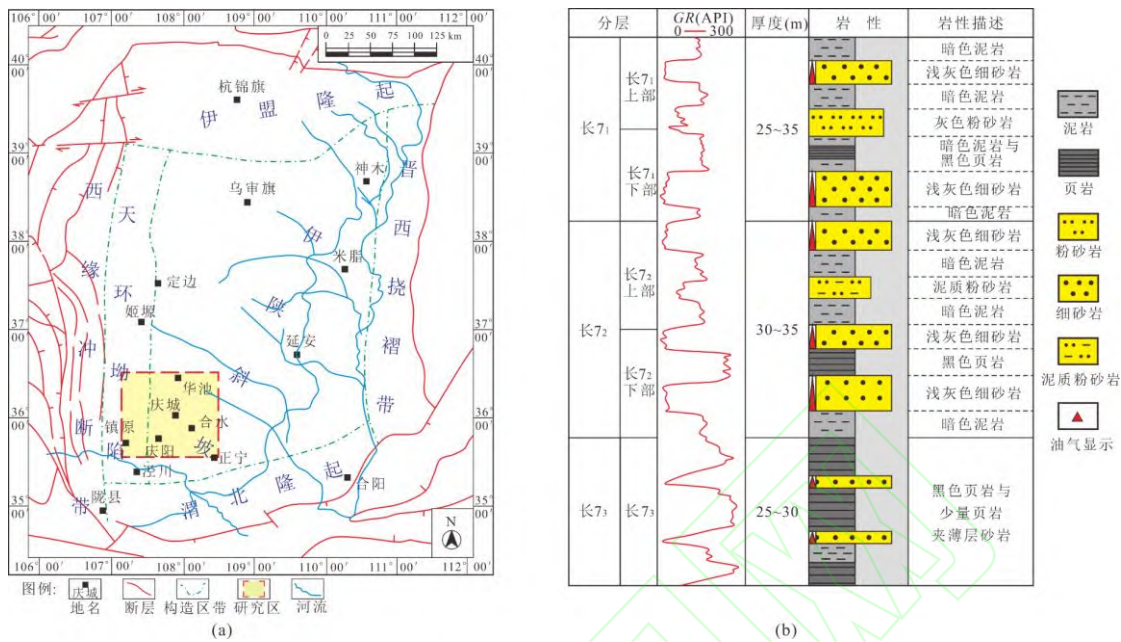


图1 研究区构造位置(a)与延长组长7段综合柱状图(b)(修改自吕奇奇等,2020)

Fig. 1 Structural location of the study area and the stratigraphic column of the Chang 7 Member

2. 数据与方法

2.1 泥页岩识别方法

泥岩与页岩具有不同地质特征,页岩具有高自然伽马值(GR)、高电阻率(Rt)以及低密度(DEN)与低电位(SP)的特征,而泥岩GR与DEN较高,Rt较低(付金华等,2020)。因此依托研究区岩心观察,结合自然伽马值、密度测井值与声波时差值建立页岩与泥岩的识别参数,GR>180 API, DEN<2.4 g/cm³, AC>240 μs/m 为黑色页岩, GR<180 API, DEN>2.4 g/cm³, AC<240 μs/m 则为泥岩(图2)。

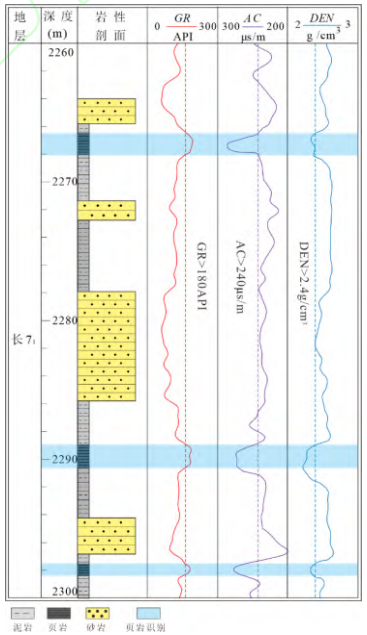


图2 研究区长7₁亚段泥页岩测井响应

Fig. 2 Logging response of mudstone and shale in the Chang 7₁ Submember of the study area

2.2 岩石热解实验与 TOC 测定

本次研究的烃源岩共涉及取自 32 口井的 56 个泥岩样品与 12 个页岩样品，其中 25 口井的烃源岩基础地球化学特征数据来自中国石油长庆油田公司，7 口井共计 25 个样品在油气资源与探测国家重点实验室完成有机碳含量（TOC）与岩石热解数据的测定，其中有机碳含量的测定利用碳硫测定仪（CS-230HC）进行测定，游离烃（S₁）、热解烃（S₂）和最高热解峰温（T_{max}）利用烃源岩热解评价仪 Rock-Eval-II 型热解仪进行测定，执行标准为 GB/T 18602-2012。

2.3 生烃热模拟实验

本次研究选取岩性为泥岩与页岩的两个样品进行开放热模拟实验，2 个样品来自庄 140 井与西 233 井，取样层段为长 7₁ 亚段，取样深度 1834 m 与 1944.3 m。生烃热模拟实验在油气资源与探测国家重点实验室完成，采用 Rock-Eval-II 中的活化能分析模块进行实验，在 10 °C/min、30 °C/min 和 50 °C/min 的升温速率条件下将样品升温，从而得到样品的累计生烃量。

2.4 孔隙度与渗透率

长 7₁ 亚段致密砂岩柱塞样来自庄 233、西 245、庄 140 等 8 取心口井，共计 52 块样次。采用美国 Coretest 公司的氦孔隙度仪 phi220 测量岩样孔隙度，渗透率采用 A-10133 气体渗透率仪测定，实验参照石油天然气行业标准 SY/T 336-2006。所有样品测试前均在 105 °C 下烘干至恒重，测试前系统均用已知体积的标准块进行校正。另外，涉及里 75、正 70、庄 206 等 13 口井长 7₁ 亚段的油层物性参数来自于中石油长庆油田分公司。

3. 源储结构划分与分布特征

与常规油藏不同，非常规油藏储层孔喉小，油藏的含油饱和度差异较大，油气短距离近源充注，使得盖层和圈闭条件的影响较低（李建忠等，2015；吕奇奇等，2020）。因此，烃源岩与储层的配置关系直接影响着油气由烃源岩向致密储层的充注过程，从而影响致密储层中的油气聚集成藏（方欣欣等，2020）。对于“源储一体”的地质条件，砂地比被证实是一个能有效分析烃源岩和储层接触关系的可靠指标，前人在吉木萨尔凹陷芦草沟组和鄂尔多斯盆地合水地区长 7 段致密砂岩的研究中取得良好的效果（郑民等，2018）。据此，在测井、录井解释的基础上结合单井砂地比，将长 7₁ 亚段划分为源夹储型、源储互层型和储夹源型三种源储组合结构（图 3）。

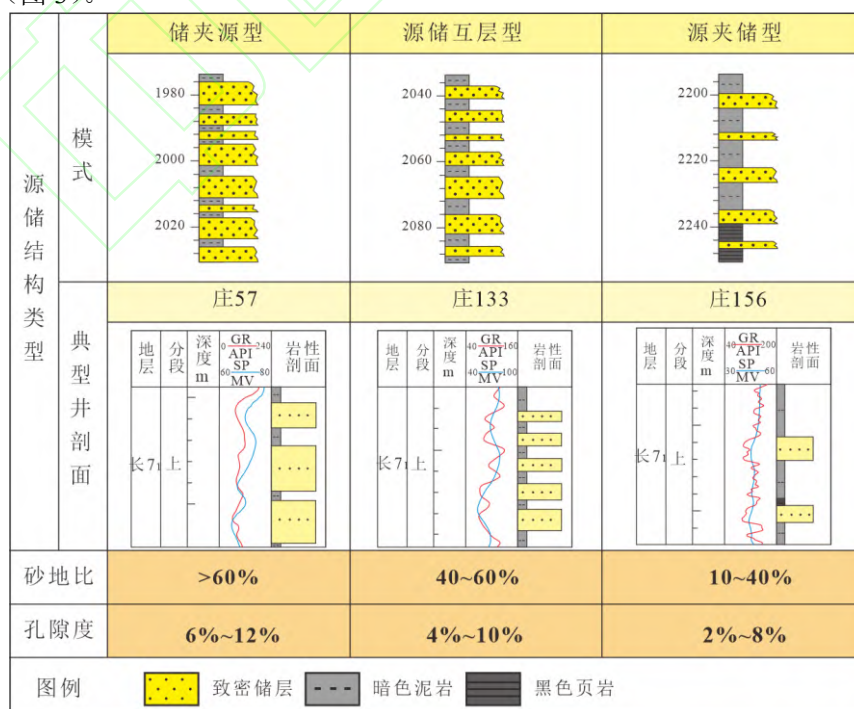


图 3 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段源储结构模式

Fig.3 Source-reservoir structure of Chang 7₁ submember in Longdong area, Ordos Basin

源储结构不仅包含了源岩与储层间的空间接触关系，也反映了不同的沉积环境（吕奇奇等，2020）。长7₁段烃源岩主要为半深湖泥岩，三种源储结构中烃源岩均以泥岩为主，页岩局部发育。并且，三种源储结构中的致密砂岩均为细粒重力流沉积，主要包括砂质碎屑流岩体和滑塌浊积岩（贾承造等，2012）。长7₁亚段沉积时期湖盆萎缩，侵蚀作用增强，大量三角洲前缘沉积的细粒碎屑物不断向湖盆深处加积，并在重力作用下在斜坡处滑塌，使得湖盆低洼地区形成大面积多期叠置的浊积扇体（张晓辉等，2020；郝松立等，2016）。因此，长7₁亚段源储结构的分布与沉积过程存在密不可分的关系。源夹储型源储结构砂地比介于10%~40%之间，为典型的泥包砂，其源地比较高（图4a），主要发育在研究区西南与东北部（图4c），为水下分流河道砂体，表现为砂质碎屑流的特征，其砂体包裹于湖相泥岩中；源储互层型砂地比介于40%~60%，由于细粒沉积物向湖盆中心加积，沉积的河道砂岩体增厚，与湖相泥岩之间转变为等间距叠置沉积的特征；储夹源型结构砂地比在60%以上，发育厚层致密砂体，在研究区中部呈东南—西北向条带状分布，为细粒碎屑物从陡坡带向下滑塌形成的浊积砂体，在湖盆低洼处纵向、横向复合叠置，呈现出砂包泥的特征，具有较低的源地比（朱筱敏等，2013）（图4b,c）。另外，孔隙度、油气产量与源储结构平面分布的耦合关系指示了油藏的分布与源储结构的分布密切相关，在储夹源与源储互层源储结构中发现大量致密砂岩油藏，而源夹储型中仅部分发育油藏（图4c,d,图5），这进一步揭示了源储结构对油气富集具有一定控制作用。以上对源储结构特征的讨论，反向印证该划分方案能包含各项地质条件的信息，为后续解剖源储结构内部的差异奠定基础。

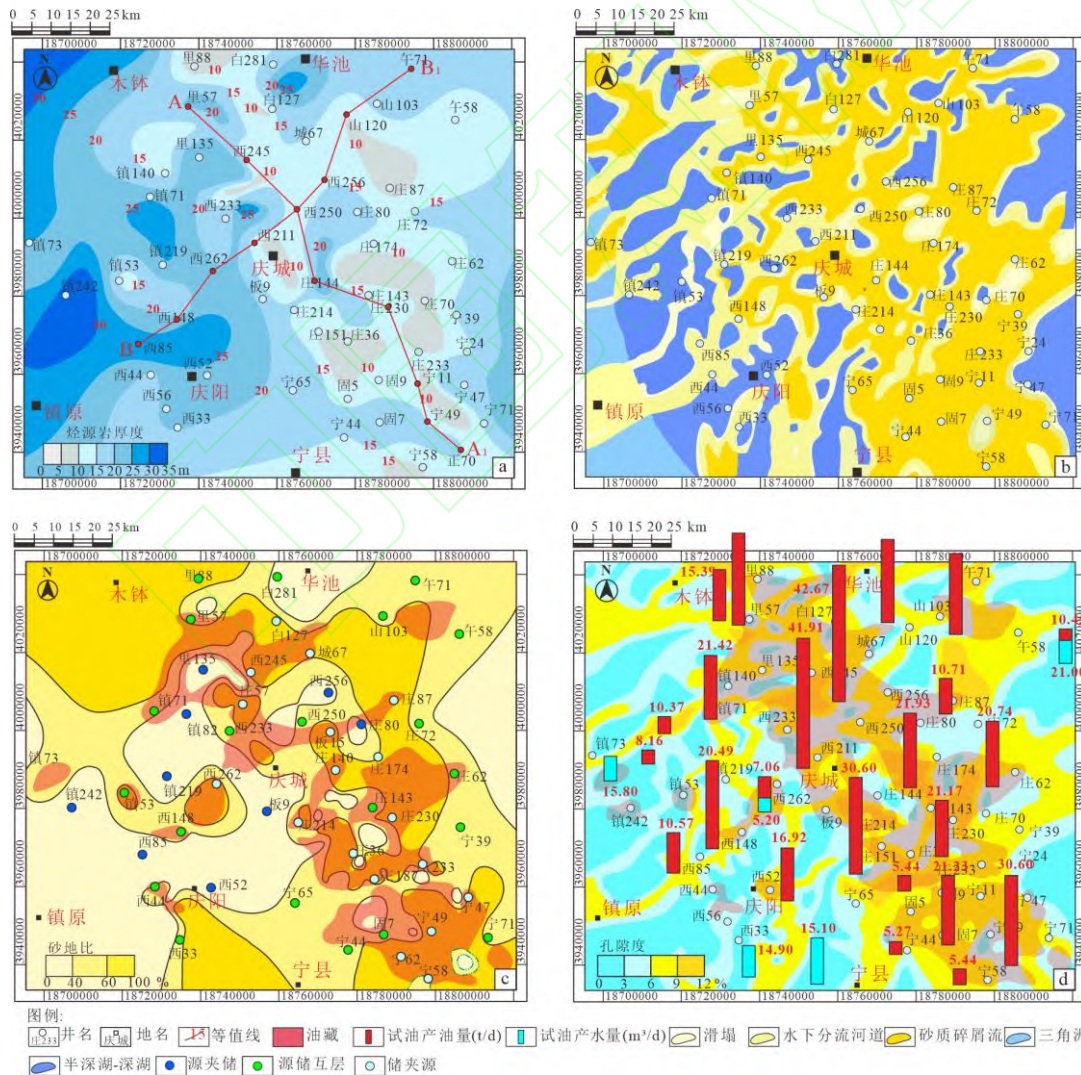


图4 鄂尔多斯盆地陇东地区长7₁亚段烃源岩厚度(a)，沉积相(b)，砂地比及油藏分布区(c)，孔隙度与油水产量平面图(d)
 Fig. 4 Thickness of source rock (a), sedimentary facies map (b), sand ratio and reservoir distribution (c), and porosity and oil production (d) of Chang 7₁ submember in Longdong area of Ordos Basin

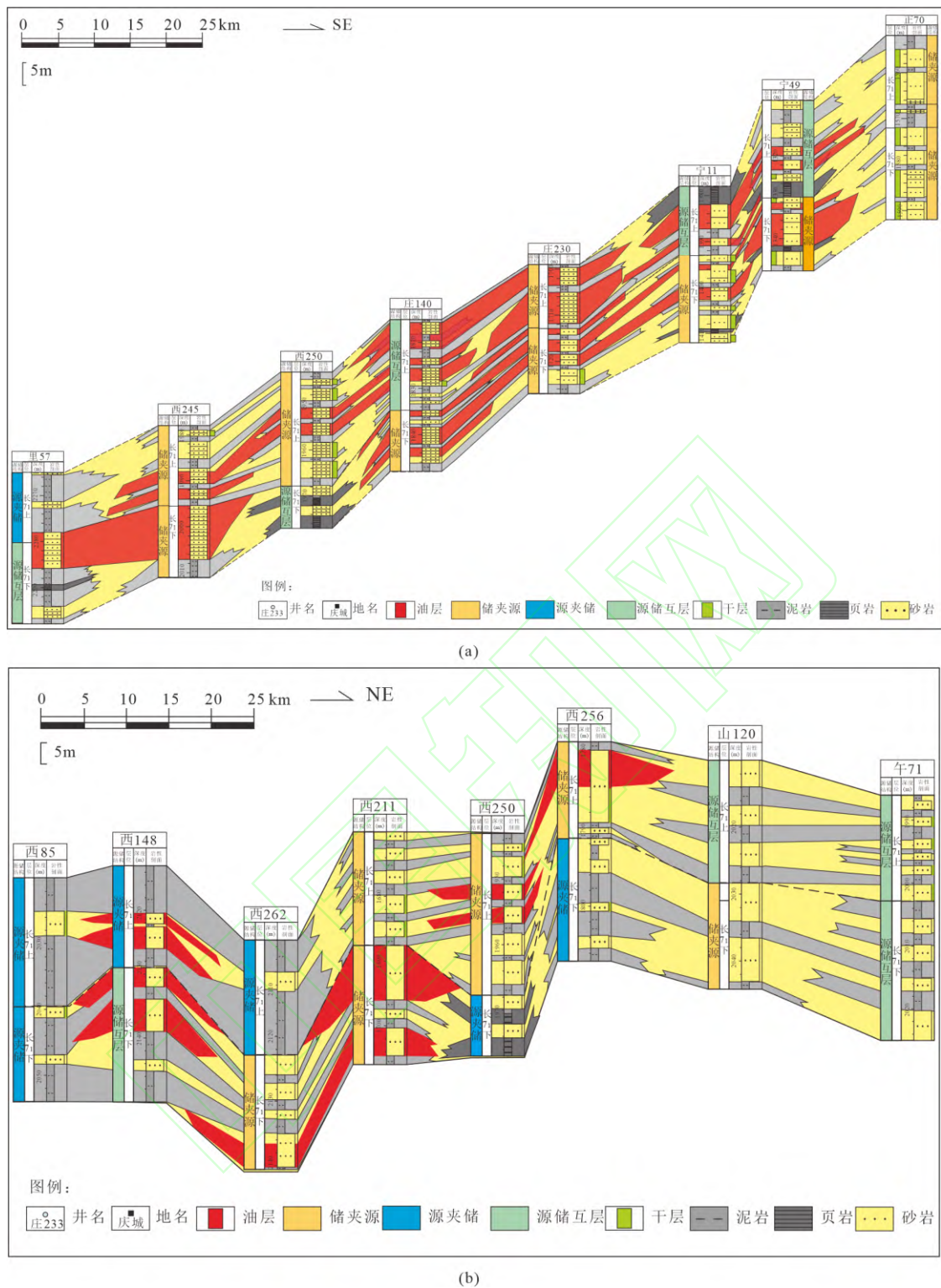


图5 鄂尔多斯盆地陇东地区长7₁段AA₁(a)与BB₁(b)烃源岩及油藏分布

Fig. 5 Distribution of AA₁ (a) and BB₁ (b) source rocks and reservoirs in Chang 7₁ submember, Longdong area, Ordos Basin

4. 源储结构烃源岩特征及差异

4.1 长7₁亚段泥岩与页岩特征

有机质是油气生成的物质基础，生烃层系中富有机质的烃源岩能够对油气田的形成产生重要作用，因此烃源岩品质、生烃潜力与成熟度从根源上控制了其供烃能力（范柏江等，2021；杨华和张文正，2005）。因此，对长7₁亚段的烃源岩进行系统分析和评价，将烃源岩分为暗色泥岩与黑色页岩进行统计，结果表明

暗色泥岩 TOC 为 0.27%~4.12%，平均 TOC 为 1.42%（图 6a）。黑色页岩 TOC 介于 0.61%~19.97%之间，均值为 5.96%，有超过 70%的样品 TOC 含量高于 2%，表现为优质烃源岩的特征（图 6a）。从单井 TOC 的分布来看，可见泥岩与页岩的 TOC 含量存在明显差异（图 6d）。湖盆中的有机质来源主要为低等水生生物与陆源有机质的共同贡献（罗曦等，2015），暗色泥岩有机质类型以 II_2 型为主，黑色页岩主要为 II_1 型和 I 型有机质（付锁堂等，2020）（图 6b）。烃源岩的埋深在研究区基本相近，长 7₁ 段泥岩与页岩的 R_o 分别介于 0.65%~1.04%和 0.65%~1.01%，均处于成熟阶段（图 6c）。整体上来看，由于泥岩与页岩有机质丰度存在显著差异，并且存在不同有机质来源的贡献，导致在同等热演化程度下，源岩的生排烃量同样存在差异。

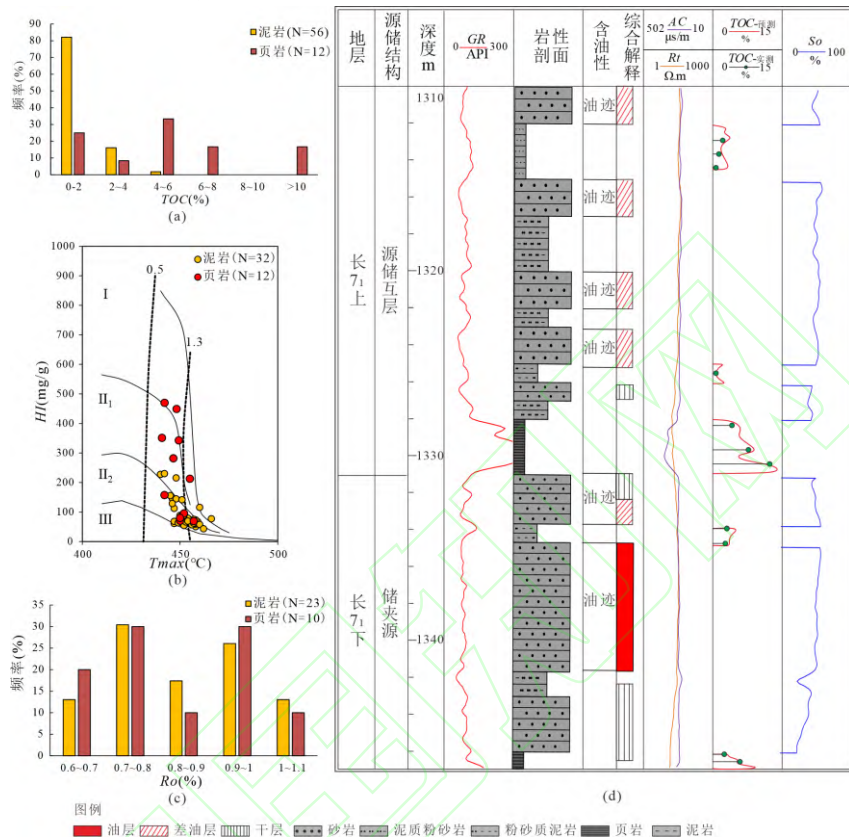


图 6 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 段泥岩页岩地化特征对比

Fig.6 Geochemical parameters of mudstone and shale of Chang 7₁ submember in Longdong area, Ordos Basin

(a) 烃源岩 TOC 分布; (b) 烃源岩有机质类型; (c) 泥页岩 R_o 分布; (d) 宁 49 井长 7₁ 亚段综合柱状图

由此，通过生烃热模拟的结果揭示了泥岩与页岩的生排烃能力，结果表明黑色页岩和暗色泥岩均具有明显的“生烃窗”，但黑色页岩生烃过程集中，最大累计生烃量 600mg/g（图 7a）；暗色泥岩生烃持续时间长，但累计生烃量低于黑色页岩，最大约为 230mg/g（图 7b）。由于生烃量与烃源岩成熟度和 TOC 密切相关，由此根据 Hou 等人（Hou et al.,2020; Hou et al.,2021）针对鄂尔多斯盆地长 7 段提出的残留烃量计算公式与建立的累计生烃量图版估算出不同 TOC 的烃源岩在各成熟度下的生排烃量，进而定量分析黑色泥岩与暗色页岩之间的差异，其残留烃量与排烃量计算公式如下：

$$RQ_{og} = Q_{tgo} \times RP_o = (f_1 \times e^{c_2 \times R_o} \times R_o^{c_3}) \times TOC + f_2 \times e^{c_2 \times R_o} \times R_o^{c_3} \quad (1)$$

$$Q_{eo} = Q_{tgo} - RQ_{og} \quad (2)$$

其中， Q_{tgo} 为总生油量或最大生油量，mg/g； RP_o 为残余生油潜力，%； Q_{eo} 为总排烃量，mg/g； R_o 为镜质组反射率，%； RQ_{og} 为残余生油量，mg/g； TOC 为页岩总有机碳含量，%； c_2 、 c_3 、 f_1 、 f_2 为常数，分别为 -5.23、1.87、419.02、-169.81； e 是自然对数的底。

计算结果显示烃源岩的生烃量及排烃量均随着模拟温度（成熟度）的升高逐渐增加，在低熟阶段（ $R_o < 0.68\%$ ）时，黑色页岩总生排烃量低于泥岩，但处于成熟阶段（ $R_o > 0.68\%$ ）时，黑色页岩的总生烃量及排烃量明显高于暗色泥岩，在成熟阶段页岩累计生排烃量约为泥岩的 2~3 倍（图 7c, e）。这说明暗色泥岩与黑色页岩的生烃高峰不一致，并且产烃率相差较大，其原因是生烃母质的差异导致页岩的反应活化能高于泥岩，页岩的生油母质以低等水生生物为主，具有更强的生烃能力。从生排烃量与源岩 TOC 的关系来

看, 泥岩与页岩的累计生排烃量与 TOC 均具有明显的正相关关系, 泥岩整体生排烃量低于黑色页岩, 表明暗色泥岩中的有机质多为陆生植物贡献的碳质, 其生油能力较弱, 而页岩中的大部分有机质能在成熟阶段反应转化为烃类物质, 且母质生烃能力强 (图 7d, f)。在对成藏的贡献作用上, 长 7 段单位质量页岩的排烃能力大致是单位质量暗色泥岩排烃能力的 1.8 倍 (高永亮等, 2019)。总之, 暗色泥岩与黑色页岩的生排烃能力差异根本上是由源岩的沉积环境所决定的, 因此在长 7₁ 亚段的各类源储结构中的烃源岩类型差异会直接影响内部致密油的富集程度。

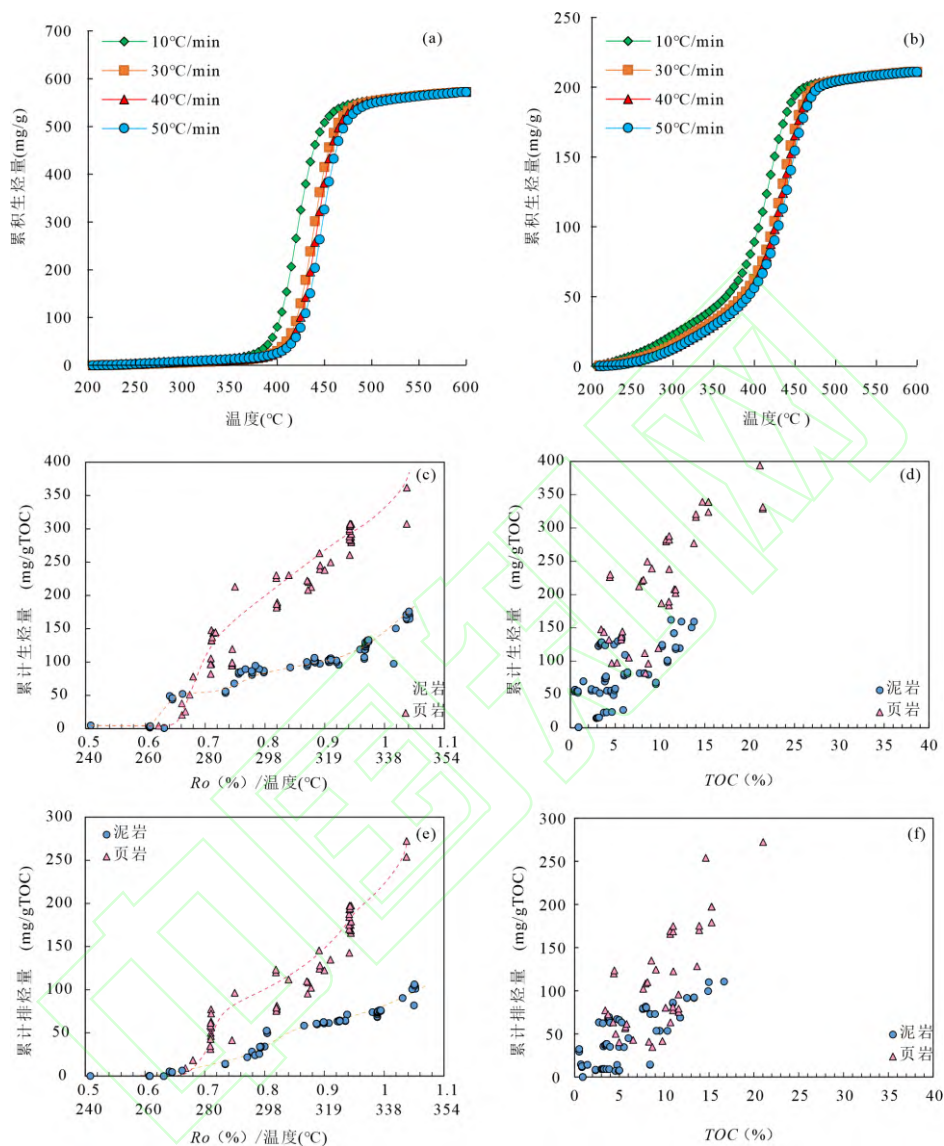


图 7 黑色页岩和暗色泥岩生排烃量特征

Fig 7 Hydrocarbon generation and expulsion of black shale and dark mudstone

(a) 庄 140 井, 1834 m, 长 7₁ 亚段, 黑色页岩开放热模拟实验累计生烃量; (b) 西 233, 1944.3 m, 长 7₁ 亚段, 暗色泥岩开放热模拟实验累计生烃量; (c) 热模拟计算不同 R_o 烃源岩累计生烃量; (d) 热模拟计算不同 TOC 烃源岩累计生烃量; (e) 热模拟计算不同 R_o 烃源岩累计排烃量; (f) 热模拟计算不同 TOC 烃源岩累计排烃量

4.2 源储结构烃源岩特征及差异

由于不同源储结构发育于不同的沉积相带中, 其伴生的烃源岩岩性、厚度和品质会存在差异。因此, 在明确了暗色泥岩与黑色页岩特征差异的基础上, 进一步解剖源储结构内部烃源岩的发育特征。首先, 源储结构之间烃源岩总厚度和单层厚度差异最显著 (图 8a, b)。源夹储型由于发育在半深湖-深湖相中, 其烃源岩总厚度介于 9.9m~27.2m, 均值为 15.2m (表 1), 具有较高的烃源岩总厚度和单层厚度, 其次为源储互层型, 该类型位于泥岩与砂体的过渡带, 随后烃源岩厚度向湖盆中减薄 (图 8a, b, 图 4a), 储夹源型具

有较低的源岩总厚度与单层厚度（表 1，图 8a,b）。鉴于泥岩与页岩在生烃能力上的差异，通过统计各源储结构类型中的泥地比（泥岩总厚度/源储结构地层总厚）和页地比（页岩总厚度/源储结构地层总厚）来侧面反映各类型结构的生排烃能力，结果显示源储结构的泥地比和页地比从高到低排序为：源夹储型、源储互层型、储夹源型（表 1），表明源夹储型的烃源岩在自源短距离充注过程中能提供更多的烃类，而储夹源型的烃源岩对临近砂体的供烃能力相对较弱。同样地，各类源储结构的烃源岩评价参数（TOC、 S_1+S_2 和 HI）的统计结果也表现出和源地比相同的变化关系，即源夹储型>源储互层型>储夹源型（图 8c,d,e, 表 1），这说明源储结构中烃源岩的厚度、泥页岩发育比例和源岩品质的发育规律是一致的，即源夹储型源储结构具有较厚的优质烃源岩，而储夹源型的源岩质量较差，且厚度较薄。因此，源储结构中的烃源岩特征差异会影响致密砂岩的含油性，但在不同的源储结构下，内部的致密油富集需要考虑致密砂岩物性与临近源岩生排烃能力的耦合关系。

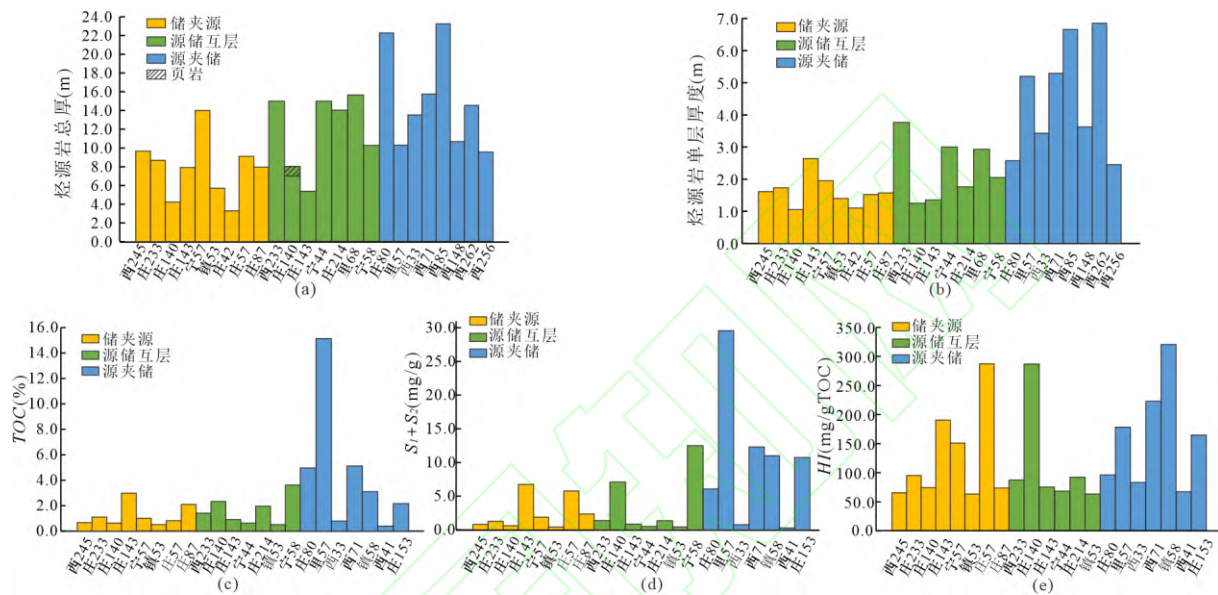


图 8 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段源储结构烃源岩特征

Fig.8 Source rock thickness and pyrolysis parameters of source-reservoir structure of Chang 7₁ Submember in Ordos Basin
各典型井长 7₁ 亚段的不同源储结构中 (a) 烃源岩总厚度；(b) 烃源岩单层厚度；(c) TOC；(d) S_1+S_2 ；(e) HI 分布直方图

表 1 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段源储结构差异

Table 1 Differences in hydrocarbon supplying ability of source-reservoir of Chang 7₁ Submember in Longdong area

类型	源岩厚度 (m)	泥地比 (%)	页地比 (%)	TOC (%)	S ₁ (mg/g)	S ₂ (mg/g)	HI (mg/gTOC)	S ₁ +S ₂ (mg/g)
储夹源型	1.6~14	8~36	0~23	0.52~3.00	0.09~3.42	0.33~5.80	63.5~287.8	0.42~6.74
	7.1	26.5	3.1	1.20	0.80	1.68	125.11	2.48
源储互层型	5.4~15.7	22~50	0~13	0.52~3.60	0.09~1.25	0.33~11.30	63.5~311.8	0.42~12.54
	10.69	40.2	3.6	2.40	0.40	3.10	140.8	3.50
源夹储型	9.9~27.2	13~83	0~40	0.36~15.30	0.16~7.40	0.09~27.20	66.7~319.6	0.34~30.8
	15.2	67	5.6	4.60	2.30	8.30	161.3	10.50

注：最小值-最大值
平均值

5. 致密砂岩源储结构烃源岩差异对含油性的影响

5.1 不同源储结构的含油性

本次研究中采用油气充注强度（ I_{oi} ）（姚涇利等，2019）、含油饱和度（ S_o ）和油层数/砂层数表征不同

源储组合中致密砂岩油气富集程度，其中 I_{ol} 其计算公式如下：

$$I_{ol} = (k \times H_o) / H_t \quad (3)$$

其中， k 为油气显示系数，基于测井解释级别进行取值，油层、含油水层、差油层和干层的系数 k 分别为 1, 0.5, 0.3 和 0.2； H_o 为油层总厚度，m； H_t 为砂层总厚度，m。

采用砂岩试油结论和含油性表征参数对研究区的含油性进行定量表征的结果表明，不同源储结构中的含油性差异显著。源夹储型平均充注强度为 0.29，平均含油饱和度 S_o 为 24.9%，含油砂体层数占比均值为 0.85，其油层数占比为 13%，差油层数占比为 44%，干层数占比 32%；源储互层型平均充注强度为 0.31，含油饱和度 S_o 均值为 42.59%，含油砂层数占总砂体层数的 52%，其试油结果显示油层、差油层和干层数分别占 21%、42%和 26%；储夹源型源储组合平均充注强度为 0.36，平均含油饱和度 S_o 为 35.23%，含油砂体占比为 52%，其油层数占比 23%，差油层与干层分别占 21%和 48%（图 9）。

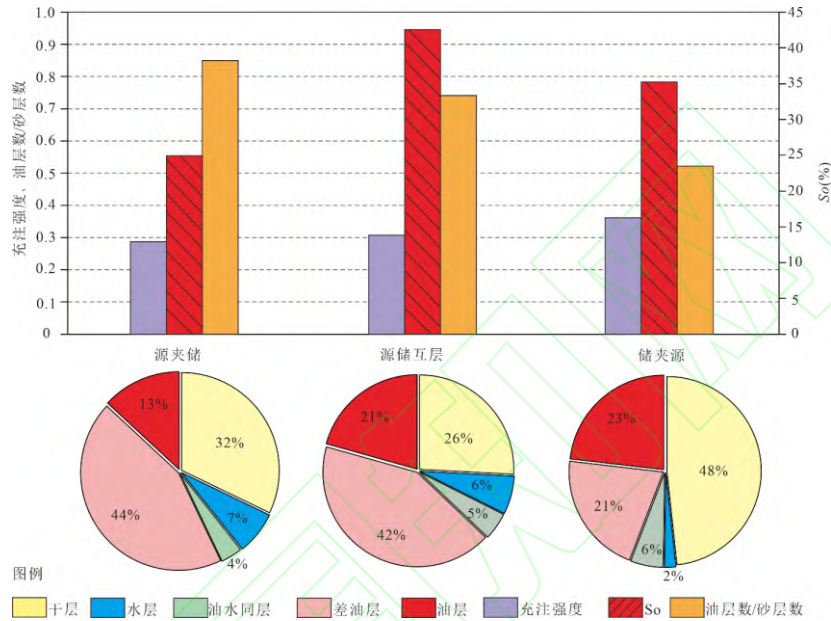


图 9 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段源储结构含油性特征

Fig.9 Difference in oil-bearing of source-reservoir structure of Chang 7₁ Submember in Ordos Basin

5.2 源储耦合控制下的含油性差异

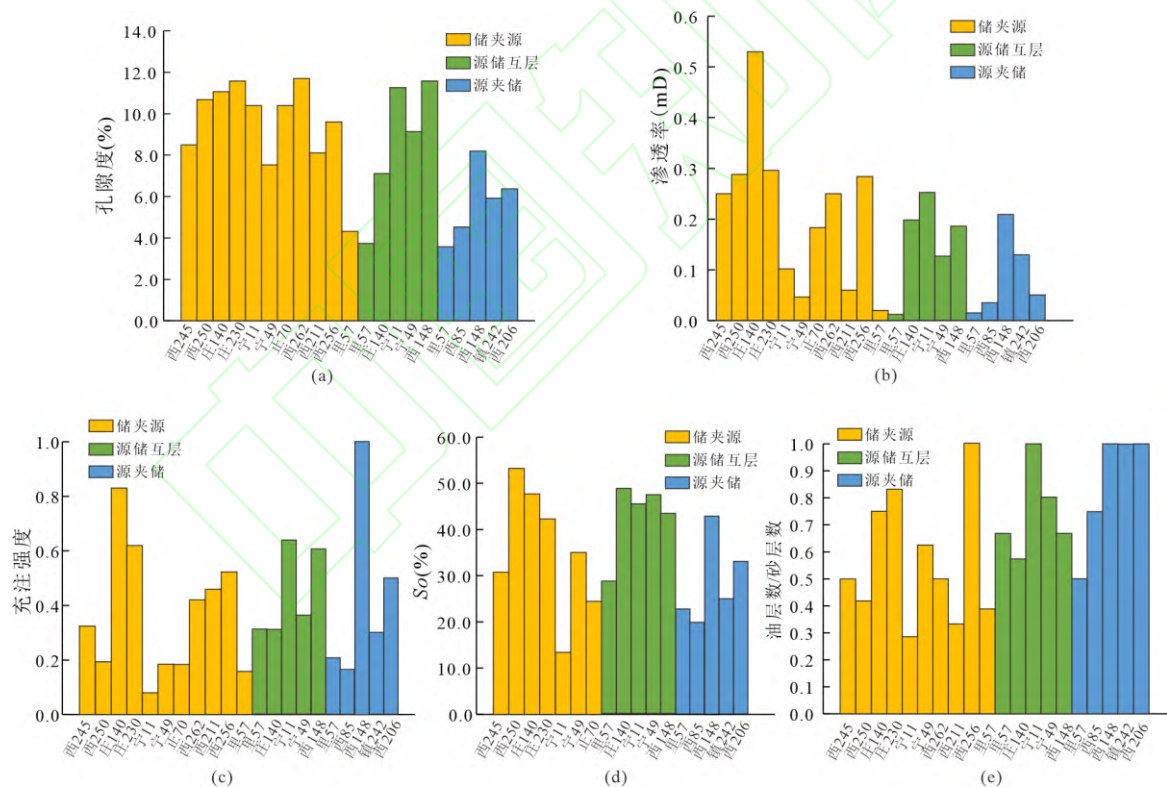
三类源储结构的含油性特征对比来看，储夹源型的充注强度略高于其余两类源储结构类型，但差异较小，试油结果中油层数的占比也证明了储夹源型的充注强度相对较高。含油饱和度之间的差异表明，源储互层型整体上具有较高的含油饱和度。而源夹储型的含油饱和度较低，但具有较高的油层数占比，这是由于其厚层优质烃源岩为临近的致密砂体提供了充足的烃类来源，随着源地比的降低，同时伴随着源岩品质的降低，源岩生成排出的烃类有限，无法满足临近逐渐变厚的砂体，导致从源夹储型到储夹源型中含油砂层数占总砂体数的比率降低。

由于致密砂岩中油气富集在储层孔隙中，储层的优劣对致密油的含油性具有影响。不同源储结构的实测物性表明，储夹源型源储结构中的孔隙最为发育，孔隙度为 4.2%~11.7%，均值为 9.4%，孔隙度大于 6% 的样本占 90%，渗透率分布于 0.02mD~0.53mD，平均值为 0.16mD。储源互层型中储层物性次之，孔隙度大于 6% 的占比为 80%，其平均孔隙和渗透率分别为 8.6%和 0.12mD。源夹储型砂岩储层的实测孔隙度介于 4%~8.6%，仅有约 60% 的样品孔隙度大于 6%，并且其渗透率均值为 0.09mD，储层物性明显低于其余两类储层。该结果与前人对该地区不同源储结构中砂体物性的分析结论一致，即储夹源型的储层物性最优，源储互层型次之，源夹储型最差（王福伟等，2022）。通常致密砂岩良好的储层物性能为油气的提供充足的储集空间，但从源储结构中砂体物性与含油性的耦合关系来看，储夹源型在多数单井中存在优质储层对应低充注强度、低含油饱和度和低含油砂体占比的特征，例如西 245、宁 11、正 70 等（图 10），这说明源储结构中砂体的含油性不仅受到物性的控制，还需要考虑内部烃源岩的生排烃能力。

因此，选取砂岩含油饱和度 S_o 、砂岩孔隙度 ϕ 和烃源岩品质 TOC ，定量确定影响致密砂岩含油性的下

限值, 结果表明对于源储互层型源储结构, 其砂岩储层孔隙度、渗透率满足致密油“甜点”地质条件(王福伟等, 2022)(图 10a, b), 内部烃源岩生排烃能力中等(表 1), 在烃源岩 TOC 较低时, S_o 的增加随 φ 的增加速度较慢, 而当烃源岩品质变好时, S_o 的增加随 φ 的增加速度变快, 在 $\varphi > 6\%$, $TOC > 1\%$ 时, 二者的有利耦合关系使得该源储结构中具有较高且稳定的含油性, 平均含油饱和度大于 40%(图 9, 图 10d, 图 11a), 并且, 烃源岩与储层略等厚互层的叠置关系能为致密油充注富集带来更高的效率(图 12)。储夹源型 S_o 变化规律与源储互层型一致, 砂岩孔隙度大部分大于 6%(图 10a, 图 11c), 是潜在的致密油富集“甜点”, 但其结构内部烃源岩的生排烃能力较弱, 源岩单层厚度薄(图 8), 导致储夹源型源储结构中的油气含油性差异较大, 含油饱和度介于 13%~53%, 当其 $\varphi > 6\%$, $TOC > 1\%$ 时, 该源储结构含油性明显增高(图 11c), 说明源储结构中烃类的供给能力对其含油性影响较大。内部源岩生排烃较强的源夹储型源储结构(表 1), 其孔隙度普遍低于致密砂岩油层“甜点”物性条件(孔隙度 $> 6\%$)(图 10a), 其砂体物性与源岩供烃能力间矛盾的耦合关系, 使得在源夹储型中砂岩的平均含油饱和度约为 25%, 表现为较差的含油性(图 10, 图 12)。仅当 $TOC > 2.5\%$, $\varphi > 5\%$ 时, 源夹储结构的致密砂岩中 $S_o > 25\%$ (图 10d, 图 11b), 此条件下可使得致密储层中连通性较好的部分孔喉富集油气。

因此, 对于自源充注、近源成藏的致密砂岩, 不同源储结构中烃源岩与储层的配置关系控制了含油性的差异, 其根本上是由不同沉积环境中烃源岩和储层的发育模式控制, 而源储结构是一个能包含沉积环境、储层和烃源岩特征的有效地质单元。总的来说, 源储互层型砂岩储层 $\varphi > 5\%$, 烃源岩生排烃能力中等, 较强的供烃效率, 促使其具有稳定且较高的含油性。储夹源型中优质储层与较差烃源岩相匹配, 导致其含油性低于源储互层; 但当 $TOC > 0.5\%$, $\varphi > 6\%$ 时, 储夹源型的含油性快速增高。尽管源夹储型烃源岩生排烃能力强, 但储层质量低, 使其整体油气富集程度较低。



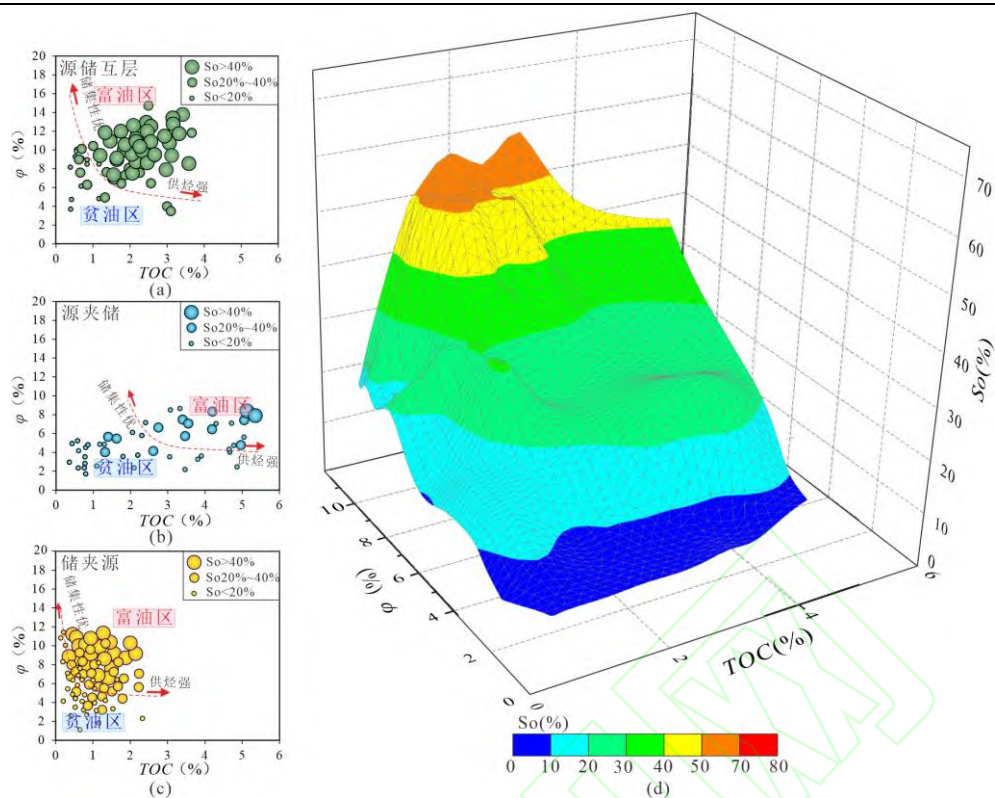


图 11 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段致密油 S_o 、 TOC 与 ϕ 耦合关系

长 7₁ 亚段源储结构致密油 S_o 、 TOC 与 ϕ 耦合关系 (a)源储互层型; (b)源夹储型; (c)储夹源型; (d)整体数据关系

Fig.11 Coupling relationship between S_o , TOC and ϕ of tight sandstone of Chang 7₁ submember in Longdong area, Ordos Basin

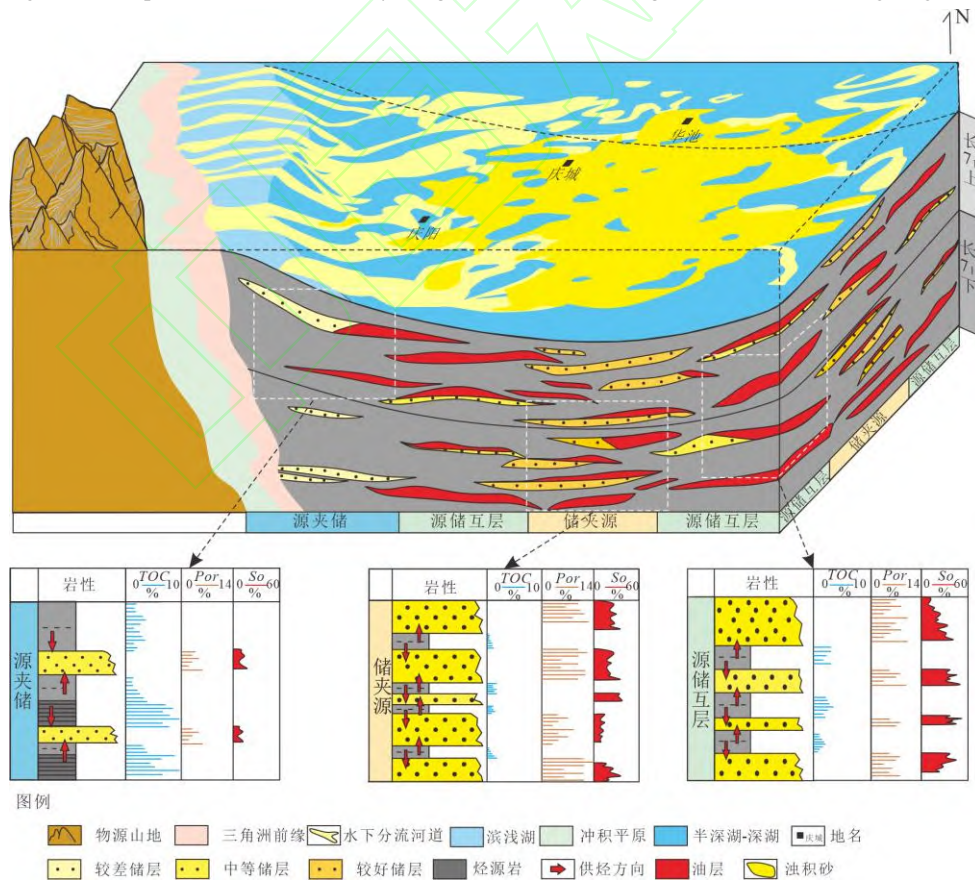


图 12 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₁ 亚段致密油差异富集模式

Fig.12 Oil enrichment pattern of tight sandstone of Chang 7₁ submember in Longdong area, Ordos Basin

6. 结论

1) 研究区主要发育源夹储型、源储互层型和储夹源型 3 种源储结构, 其中源夹储型主要发育在研究区西南与东北部, 以半深湖-深湖相为主; 源储互层型表现为烃源岩与砂体等间距叠置沉积的特征, 分布于浊积砂体与半深湖-深湖相泥岩之间; 储夹源型结构呈现出砂包泥的特征, 在研究区中部呈东南—西北向条带状分布。同时在储夹源与源储互层源储结构中发现大量致密砂岩油藏, 而源夹储型中仅部分发育油藏。

2) 由于沉积环境和生油母质的差异, 黑色页岩的生烃率和排烃率明显高于暗色泥岩, 并且由于源储结构中泥页岩的差异, 使得高源地比的源夹储型源储结构具有最优的自源供烃条件, 而源储互层型次之, 储夹源型相对较差。

3) 源储结构中烃源岩品质与储层物性的匹配关系控制了其内部致密油的差异富集。其中, 源储互层型中优质的储层、中等品质的烃源岩与二者互层的紧密叠置关系, 促使其具有稳定且较高的含油性。储夹源型优质储层与较差烃源岩耦合导致其含油性次之, 在 $\text{TOC} > 0.5\%$, $\phi > 6\%$ 时含油性增高。源夹储型储层物性较差, 使得其含油性较低。

致谢

感谢中国石油长庆油田公司中石油战略合作科技专项(No. ZLZX2020-02-01-03)的支持, 为本研究提供数据, 并允许发表研究结果。同时感谢张枝焕教授团队提供的热模拟实验数据。

References

- Cui, J.W., Zhu, R.K., Li, S., et al, 2019. Development Patterns of Source Rocks in Depression Lake Basin and its Controlling Effect on Oil Accumulation: Case Study of the Chang 7 Shale of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(7):982-996 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J.X., Zhou, H., Wang, H., et al, 2015. The influence of pore structure in reservoir sandstone on dispersion properties of elastic waves. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(9):3389-3400 (in Chinese with English abstract).
- Fang, X.X., Guo, Y.C., Wang, P., et al, 2020. The Progress of Research on Tight Oil Accumulation and Several Scientific Issues Requiring Further Study. *Geology in China*, 47(1):43-56(in Chinese with English abstract).
- Fu, S.T., YAO, J.L., LI, S.X., et al, 2020. Enrichment Characteristics and Resource Potential of Continental Shale Oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(5):698-710 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Yu, J., Xu, L.M. et al, 2015. New Progress in Exploration and Development of Tight Oil in Ordos Basin and Main Controlling Factors of Large-scale Enrichment and Exploitable Capacity. *China Petroleum Exploration*, 20(5):9-19 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Li, S.X., Niu, X.B. et al, 2020. Geological Characteristics and Exploration of Shale Oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5):870-883(in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Dong, G.D. Zhou, X.P., et al, 2021. Research Progress of Petroleum Geology and Exploration Technology in Orlos Basin. *China Petroleum Exploration*. 26(3):19-40 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Li, S.X., Guo, Q.H., et al, 2022. Enrichment Condition and Favorable Area Optimization of Continental Shale Oil in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Fan, B.J., Mei, Q.L., Wang, X.J., et al, 2020. Geochemical Comparison of Mudstone and Shale—A case Study of the 7th Member of Yanchang Formation in Ansai area, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(6):1119-1128 (in Chinese with English abstract).
- Fan, B.J., Jin, Y., Shi, L., et al, 2021. Shale Oil Exploration Potential in Central Ordos Basin: A case Study of Chang 7 Lacustrine Shale. *Oil & Gas Geology*, 42(5):1078-1088 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.L., Wen, Z.G., Li, W., 2019. Geochemical Characteristics of Lacustrine Organic-Rich Fine-Grained Sedimentary Rocks and its Effects on the Accumulation of Tight Oil : Case Study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(5):729-739(in Chinese with English abstract).
- Hao, S.L., Li, Z.Y., Li, W.H., 2016. Sedimentary Characteristics of Turbidite of Chang 7 Member in Southwestern Ordos Basin.

- Hou, L.H., Ma, W.J., Luo, X., et al, 2020. Characteristics and Quantitative Models for Hydrocarbon Generation Retention-Production of Shale under ICP Conditions: Example from the Chang 7 Member in the Ordos Basin. *Fuel*, 279,118497, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118497>
- Hou, L.H., Xia, L., Lin, S.H., et al, 2021. Assessment of Recoverable Oil and Gas Resources by In-Situ Conversion of Shale-Case Study of Extracting the Chang 73 Shale in the Ordos Basin. *Petroleum Science*, <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.10.015>.
- He, H.N., Zhao, W.W., Wang, H.Z., et al, 2019. Mechanism of Hydrocarbon Accumulation Formation and Main Controlling Factors in Chang 7 Tight Oil of Yanchang Formation, Southeastern Ordos Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 6(3):33-40+57(in Chinese with English abstract).
- Huo, P.P., Fan, B.J., Wang, Y.Y., et al, 2021. Geochemical Characteristics of Shale Gas with Moderate Thermal Evolution in Chang7 Member, Central Ordos Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 28(2):49-56(in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., Zou, C.N., Li J.Z., et al, 2012. Assessment Criteria, Main Types, Basic Features and Resource Prospects of the Tight Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3):343-349(in Chinese with English abstract).
- Johnstone B.,2007. Bakken Black Gold. Lesder-Poster,12-10(6).
- Li, J.Z., Zhen, M, Chen, X.M., et al, 2015. Connotation Analyses, Source-Reservoir Assemblage Types and Development Potential of Unconventional Hydrocarbon in China. *Acta Petrolei Sinica*, 36(5):521-532(in Chinese with English abstract).
- Liu, X.Y., Guo, W., Liu, J.Y., et al, 2023. Characteristics and Exploration Prospects of Deep-Water Sandstone Reservoir of Chang 73 Sub-Member, Ordos Basin. *Earth Science*, 48(1):279-292(in Chinese with English abstract).
- Lu, Q., Gao, Y., Zhang, Z.Y., et al, 2022. A Comparative Study of Geological Conditions of Tight Oils in China and USA. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(2):199-209(in Chinese with English abstract).
- Luo, X., Liu, Z.S., Tan, J.J., et al, 2015. Continental Shale Organic Matter Characteristics and Enrichment Factors Analysis of Biyang Sag. *Petroleum Geology and Engineering*, 29(6):11-14+141(in Chinese with English abstract).
- Lyu, Q.Q., Luo, S.S., Li, M.J.et al, 2020. Sedimentary Characteristics and Distribution of Deep-Water Hybrid event Beds Comprising debris and Turbidites: a Case Study of Chang7 Oil Formation in the Southwest of Ordos Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 44(2):69-78+9-10(in Chinese with English abstract).
- Sun, L.D., Zou, C.N., Jia, A.L., et al, 2019. Development Characteristics and Orientation of Tight Oil and Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(6): 1015-1026(in Chinese with English abstract).
- Wang, F.W., Chen, D.X., XIE, G.J., et al, 2022. Differential Enrichment Mechanism of Tight Sandstone Oil under the Control of the Source-Reservoir Structures of Member 7 of Yanchang Formation in Qingcheng Area, Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*,43(7):941-956+976(in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Zhang, W.Z.,2005. On the Leading Role of High-Quality Source Rocks in the Chang 7 Member of the Ordos Basin in the Accumulation and Enrichment of Low-Permeability Oil and Gas: Geological and Geochemical Characteristics. *Geochimica*, (2):147-154(in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Zhang W.Z., Liu, X.Y., et al, 2013. Key Role of High-Quality Source Rocks on the Formation of Low-Permeability Oil-Rich Reservoirs in Ordos Basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(4): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Yan, H., Liang, X.W., Niu, X.B., et al, 2017. Geological Conditions for Continental Tight Oil Formation and the Main Controlling Factors for the Enrichment: A Case of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1):12-20(in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Deng, X.Q., Zhao, Y.D., et al, 2013. Characteristics of Tight Oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(2):150-158(in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Zeng, J.H., Luo, A.X., et al, 2019. Controlling Effect of Source Reservoir Structure in Tight Reservoir on Oil-Bearing Property——A Case Study of Chang 6-Chang-8 Members in Heshui Area of Ordos Basin, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(3): 267-280(in Chinese with English abstract).
- Zhong, G.R., Zhang, X.L., Du, J.M., et al, 2016. Source-Reservoir Configuration of Logging Evaluation for Tight Oil in Chang 7 member, Yanchang formation, Ordos basin. *Progress in Geophysics*, 31(5):2285-2291(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhu, R.K., Wu, S.T., et al, 2012. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional

- Hydrocarbon Accumulations: Taking Tight Oil and Tight Gas in China as an Instance. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2):173-187(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Dong, D.Z., et al, 2022. Formation, Distribution and Prospect of Unconventional Hydrocarbons in Source Rock Strata in China. *Earth Science*, 47(5):1517-1533(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., Deng, X.Q., LIU, Z.L. et al, 2013. Sedimentary Characteristics and Model of Shallow Braided Delta in Large-Scale Lacustrine: An Example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2):19-28(in Chinese with English abstract).
- Zhou Q.F., 2021. Development Status and Prospects of Shale Gas and Tight Oil in the United States. *Sino-Global Energy*, 26(5):1-8(in Chinese with English abstract).
- Zheng, M., Li, J.Z., Wang, W.G., et al, 2018. Analysis of Oil Charging and Accumulation Processes in Tight Reservoir Beds: A Case Study of Lucaogu Formation in Jimsar Sag of Junggar Basin, NW China. *Earth Science*, 43(10):3719-3732(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.H., Feng, S.Y., Liang, X.W., et al, 2020. Sedimentary Microfacies Identification and Inferred Evolution of the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Longdong Area, Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3):957~967(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔景伟,朱如凯,李森,等,2019.坳陷湖盆烃源岩发育样式及其对石油聚集的控制——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组为例. *天然气地球科学*, 30(7):982-996.
- 邓继新,周浩,王欢,等,2015.基于储层砂岩微观孔隙结构特征的弹性波频散响应分析. *地球物理学报*, 58(9):3389-3400.
- 方欣欣,郭迎春,王朋,等,2020.致密油成藏研究进展与待解决的重要科学问题. *中国地质*, 2020, 47(1):43-56.
- 付锁堂,姚泾利,李士祥,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力. *石油实验地质*, 42(5):698-710.
- 付金华,喻建,徐黎明,等,2015.鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素. *中国石油勘探*, 20(5):9-19.
- 付金华,李士祥,牛小兵,等,2020.鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践. *石油勘探与开发*, 47(5):870-883.
- 付金华,董国栋,周新平,等,2021.鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术. *中国石油勘探*, 26(3):19-40.
- 付金华,李士祥,郭芪恒,等,2022.鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选. *石油学报*:1-14[2022-03-07]
- 范柏江,梅启亮,王小军,等,2020.泥岩与页岩地化特征对比——以鄂尔多斯盆地安塞地区延长组 7 段为例. *石油与天然气地质*, 41(6):1119-1128.
- 范柏江,晋月,师良,等,2021.鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组 7 段湖相页岩油勘探潜力. *石油与天然气地质*, 42(5):1078-1088.
- 高永亮,文志刚,李威,2019.湖相富有机质细粒沉积岩地球化学特征及其对致密油气成藏的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7 段为例. *天然气地球科学*, 30(5):729-739.
- 郝松立,李兆雨,李文厚,2016.鄂尔多斯盆地西南部延长组长 7 段浊积岩沉积特征. *地质通报*, 35(Z1):424-432.
- 何浩男,赵卫卫,王汇智,等,2019.鄂尔多斯盆地东南部延长组长 7 致密油成藏机制及主控因素. *非常规油气*, 6(3):33-40+57.
- 霍萍萍,范柏江,王妍妍,等,2021.鄂尔多斯中部长 7 段中等热演化程度页岩气地球化学特征. *特种油气藏*, 28(2):49-56.
- 贾承造,邹才能,李建忠等,2012.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. *石油学报*, 33(3):343-349.
- 李建忠,郑民,陈晓明,等,2015.非常规油气内涵辨析、源-储组合类型及中国非常规油气发展潜力. *石油学报*, 36(5):521-532.
- 刘显阳,郭雯,刘江艳,等,2023.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. *地球科学*, 48(1):279-292.
- 罗群,高阳,张泽元,等,2022.中国与美国致密油形成条件对比研究. *石油实验地质*, 44(2):199-209.
- 罗曦,刘子胜,胥玲,等,2015.泌阳凹陷陆相页岩有机质特征及富集因素分析. *石油地质与工程*, 29(6):11-14+141.
- 吕奇奇,罗顺社,李梦杰,等,2020.深水碎屑流与浊流混合事件层沉积特征及分布——以鄂尔多斯盆地西南长 7 油层组为例. *东北石油大学学报*, 44(2):69-78+9-10.
- 孙龙德,邹才能,贾爱林,等,2019.中国致密油气发展特征与方向. *石油勘探与开发*, 46(6):1015-1026.
- 王福伟,陈冬霞,解广杰,等,2022.鄂尔多斯盆地庆城地区延长组 7 段源-储结构控制下致密砂岩油的差异富集机制. *石油学报*, 43(7):941-956+976.
- 杨华,张文正,2005.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. *地球化学*,

(2):147-154.,

杨华, 张文正, 刘显阳, 等, 2013. 优质烃源岩在鄂尔多斯低渗透富油盆地形成中的关键作用. 地球科学与环境学报, 35(4): 1-9.

杨华, 梁晓伟, 牛小兵, 等, 2017. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段为例. 石油勘探与开发, 44(1): 12-20.

姚涇利, 邓秀芹, 赵彦德, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征. 石油勘探与开发, 40(2): 150-158.

姚涇利, 曾溅辉, 罗安湘, 等, 2019. 致密储层源储结构对储层含油性的控制作用——以鄂尔多斯盆地合水地区长 6~长 8 段为例. 地球科学与环境学报, 41(3): 267-280.

钟高润, 张小莉, 杜江民, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段致密油源储配置关系测井评价. 地球物理学进展, 31(5): 2285-2291.

邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等, 2012. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例. 石油学报, 33(2): 173-187.

邹才能, 杨智, 董大忠, 等, 2022. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望. 地球科学, 47(5): 1517-1533.

朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等, 2013. 大型坳陷湖盆地浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例. 地学前缘, 20(2): 19-28.

周庆凡, 2021. 美国页岩气和致密油发展现状与前景展望. 中外能源, 26(5): 1-8.

郑民, 李建忠, 王文广, 等, 2018. 致密储层石油充注成藏过程分析: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. 地球科学, 43(10): 3719-3732.

张晓辉, 冯顺彦, 梁晓伟, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7 段沉积微相及沉积演化特征. 地质学报, 94(3): 957-967. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020112.