

doi: 10.12029/gc20200117

黄振凯, 郝运轻, 李双建, 沃玉进, 孙冬胜, 黎茂稳, 陈建平. 2020. 鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以 H317 井为例[J]. 中国地质, 47(1): 210–219.

Huang Zhenkai, Hao Yunqing, Li Shuangjian, Wo Yujin, Sun Dongsheng, Li Maowen, Chen Jianping. 2020. Oil-bearing potential, mobility evaluation and significance of shale oil in Chang 7 shale system in the Ordos Basin: A case study of well H317[J]. Geology in China, 47(1):210–219 (in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以 H317 井为例

黄振凯^{1,2}, 郝运轻^{1,2}, 李双建^{1,2}, 沃玉进^{1,2}, 孙冬胜^{1,2}, 黎茂稳^{1,2}, 陈建平³

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100081)

摘要:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段泥页岩层系为研究对象, 基于大量实际地质样品统计, 建立其生、排油模式, 并认为长 7 段页岩油的可动门限(排烃门限)在 70 mg/gTOC, 并以此为基础建立了适用于鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩层系页岩油含油性和可动性评价模板。评价模板中将该区页岩油划分为有效资源、潜在资源和无效资源三大类。以 H317 井实际地质应用实例, 使用评价模板对其不同岩性进行了系统分类。H317 井长 7 段泥页岩层系中非源岩夹层段及部分块状泥岩等可作为页岩油勘探开发的有效资源和有利目标, 黑色页岩虽然含油性较好, 但流体组份偏重, 流动性差, 针对这类资源可采用原位加热改质后开采等工程技术手段, 因此可作为页岩油勘探开发的潜在资源。

关键词:页岩油; 泥页岩层系; 含油性; 可动性; 油气勘查工程; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)01-0210-10

Oil-bearing potential, mobility evaluation and significance of shale oil in Chang 7 shale system in the Ordos Basin: A case study of well H317

HUANG Zhenkai^{1,2}, HAO Yunqing^{1,2}, LI Shuangjian^{1,2}, WO Yujin^{1,2},
SUN Dongsheng^{1,2}, LI Maowen^{1,2}, CHEN Jianping³

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing, 100081, China)

Abstract: Taking the Chang 7 shale system of Yanchang Formation in Ordos Basin as the research target and based on the statistics of a large number of geological samples, the authors established the oil generation and expulsion model. The movable threshold (hydrocarbon expulsion threshold) of the Chang 7 shale system was considered to be 70 mg/g TOC, and the evaluation template of shale oil in Chang 7 shale system was established, which included oil-bearing potential and mobility. In the evaluation template, the shale oil in this area was divided into three categories: effective resources, potential resources and ineffective resources. Based on

收稿日期: 2019-06-10; 改回日期: 2019-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(41702137)和中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA14010406)联合资助。

作者简介: 黄振凯, 男, 1985 年生, 博士, 油气地质与地球化学; E-mail: huang_zhenkai@163.com。

the actual geological application examples of well H317, the different lithologies were systematically classified using the evaluation template. Sandstone, silty mudstone and some massive mudstone in the Chang 7 shale system of well H317 are probably the effective resources and favorable targets for shale oil exploration and development. Although the oil-bearing capacity of black shale is good, the composition is heavy and that will cause the fluidity to be not as good as the other kinds of lithologies mentioned previously. However, by using engineering techniques such as situ mining, it may become a potential target for shale oil exploration in this area.

Keywords: shale oil; shale system; oil-bearing; mobility; oil-gas exploration engineering; Ordos Basin

About the first author: HUANG Zhenkai, male, born in 1985, doctor, engages in the study of petroleum geology and geochemistry; E-mail: huang_zhenkai@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41702137), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA14010406).

1 引言

鄂尔多斯盆地三叠系延长组发育的长7段泥页岩层系是该盆地主要的烃源岩层系(孙宁亮等, 2019)。长7段泥页岩沉积时期为湖盆发育的鼎盛时期,深湖-半深湖相泥页岩沉积广泛发育且分布相对稳定(贾承造等, 2012;金之钧等, 2012;张金川等, 2012;邹才能等, 2013)。该层段的有机质丰度平均分布在2%~6%,部分泥页岩TOC含量可达10%甚至更高,属于优质烃源岩(杨华等, 2013;高岗等, 2013, 张文正等, 2015)。长7段泥页岩层系的热演化程度在盆地不同地区存在一定差异, R_o 值总体分布在0.7%~1.1%,整体处于生油阶段(杨华等, 2005; 张文正等, 2008; 周文等, 2013; 王香增等, 2014)。总体来看,长7段泥页岩层系具有形成页岩油的良好物质基础和资源前景(张文正等, 2008; 周文等, 2013; 白玉彬等, 2013; 王香增等, 2014)。

近些年来中国石油、中国石化及延长石油分别针对鄂尔多斯盆地长7段页岩油气资源开展了研究和勘探工作。2012年中国石油通过体积压裂等手段对陇东地区延长组油页岩进行开发后,获得较好的原油产出(白玉彬等, 2012; 冉冶等, 2016)。2011年延长石油在陕北斜坡针对长7段陆相页岩气开展勘探工作,其中取得重要突破的LP177井获得日产气量2350 m³,新WJ、延YY、LP179、新WQ等井也获得了较好的页岩气显示(耳闯等, 2013; 姜呈馥等, 2013; 朱定伟等, 2013; 耳闯等, 2016)。近期中石化在鄂南地区也针对长7段泥页岩层系湖相页岩油开展了相关研究工作。但相比于北美在经历将近30年的技术攻关和生产实践下在页岩油气领域

取得的巨大成功而言,中国陆相页岩油勘探仍处于起步阶段(黎茂稳等, 2017),总体尚未取得突破。

通过系统梳理和总结近些年来中国在陆相页岩油勘探的经验发现,针对长7段泥页岩层系的排烃效率、残留烃量,以及不同岩性(岩相)的含油性和可动性等基础问题的研究较少、认识不清晰,这些问题既是制约页岩油勘探的瓶颈问题,也是勘探家和学者们广泛关注的热点问题。如何有效地解决上述问题将对陆相页岩油富集有利岩区分布与预测、页岩油勘探具有重要意义。因此本文通过系统的地质与地球化学分析,建立了适用于延长组长7段泥页岩层系不同岩性的含油性与可动性的评价模板,以期能够对陆相页岩油资源评价等重要地质问题提供有效的解决方法。

2 研究样品及其地质与地球化学特征

本文在建立页岩含油性与可动性评价模板的工作中选取了研究区内处于不同演化阶段的延长组长7段381块泥页岩样品。本文重点讨论的H317井的泥页岩镜质体反射率大致为1.1%。H317井位处鄂尔多斯盆地中部(图1),长7段泥页岩层段厚度约为60 m,岩性为粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩、块状泥岩和黑色页岩。单井地球化学剖面(图2)显示,2468 m以浅的粉砂质泥岩TOC含量平均2.16%,游离烃含量 S_i 分布在2.75~5.76 mg/g,平均4.09 mg/g岩石, S_i /TOC分布在107~289.5 mg/gTOC,平均204.13 mg/gTOC,有机质类型以II型为主;块状泥岩TOC含量平均3.46%,游离烃含量 S_i 分布在0.29~4.9 mg/g岩石,平均2.01 mg/g岩石, S_i /TOC分布在53.4~74.3 mg/gTOC,平均70.83 mg/g

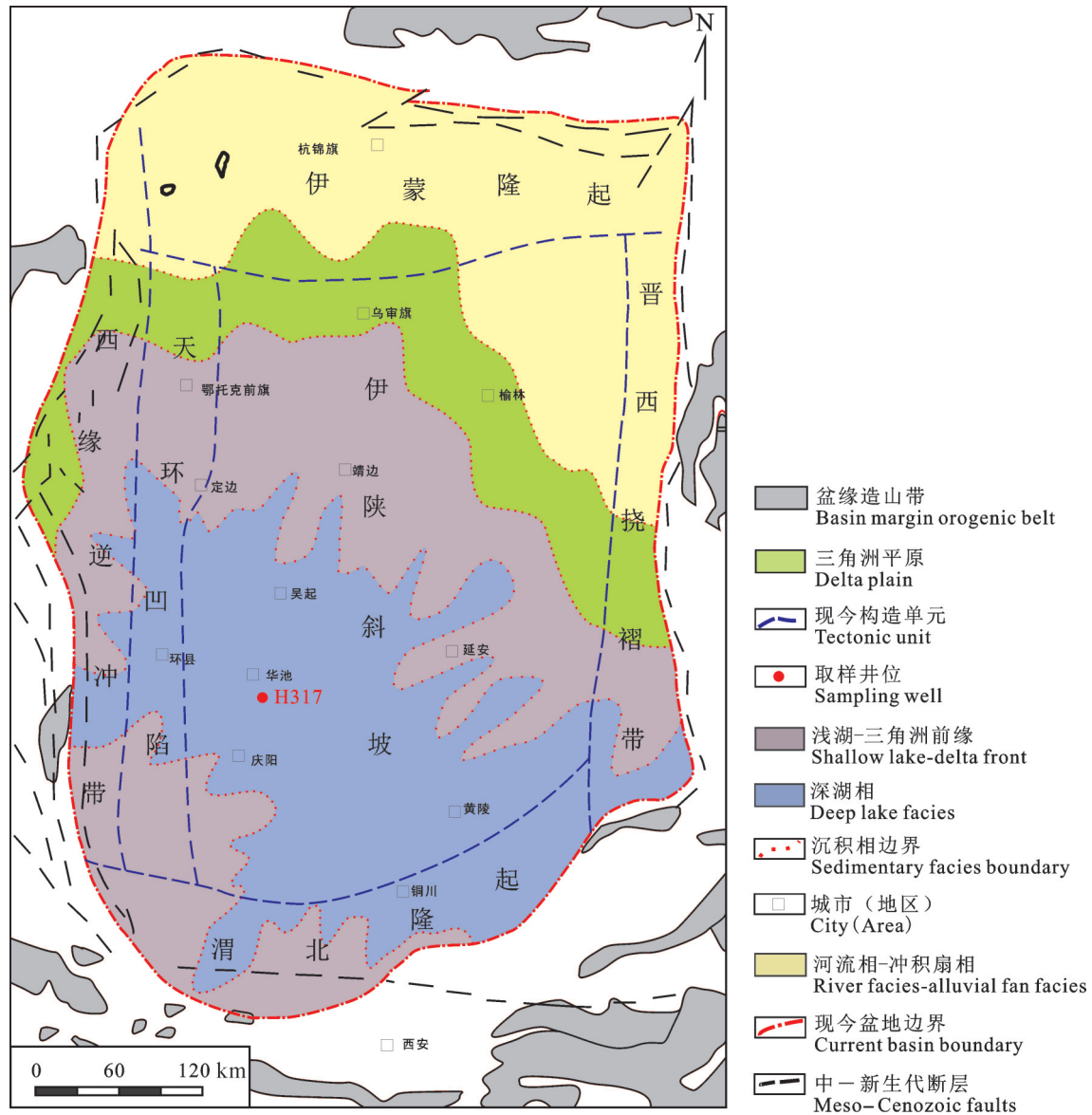


图1 研究区样品采集分布图(据黄振凯等,2018)

Fig.1 Sample collection and distribution map in the study area (after Huang Zhenkai et al., 2018)

gTOC,有机质类型以Ⅱ型为主;2468 m以深的黑色页岩TOC含量和游离烃含量 S_1 整体高于浅部的泥岩和粉砂质泥岩,分别分布于4%~19%和1.6~5.1 mg/g岩石, S_1 /TOC分布在20~45.1 mg/gTOC,平均30.93 mg/gTOC,有机质类型以Ⅰ型为主。

3 长7段页岩油可动性门限(排油门限)

Jarvie (2012, 2014) 通过系统统计 Bakken、Eagle Ford、Marcellus、Montney 等北美主要的页岩油产层的 S_1 与TOC数据后认为泥页岩层系原油流动存在特定的门限值,即含油饱和度指数(Oil

Saturation Index,简称OSI,下同)为100 mg/gTOC,其地球化学意义为单位有机碳含量对应的热解 S_1 含量(即烃指数: S_1 /TOC,下同),也就是说当泥页岩层系中已经生成的烃类在满足了体系内部的吸附和储集空间的容留,即OSI达到100 mg/gTOC后,多余的烃类将排出泥页岩层系。值得注意的是Jarvie (2012, 2014)得到的100 mg/gTOC页岩油可动性门限是统计北美海相泥页岩地层得到的统计性结果,而鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系属于典型的湖相沉积。地质条件的差异性使得前人(Jarvie, 2012, 2014)建立的页岩油可动性门限可能并不适用湖相

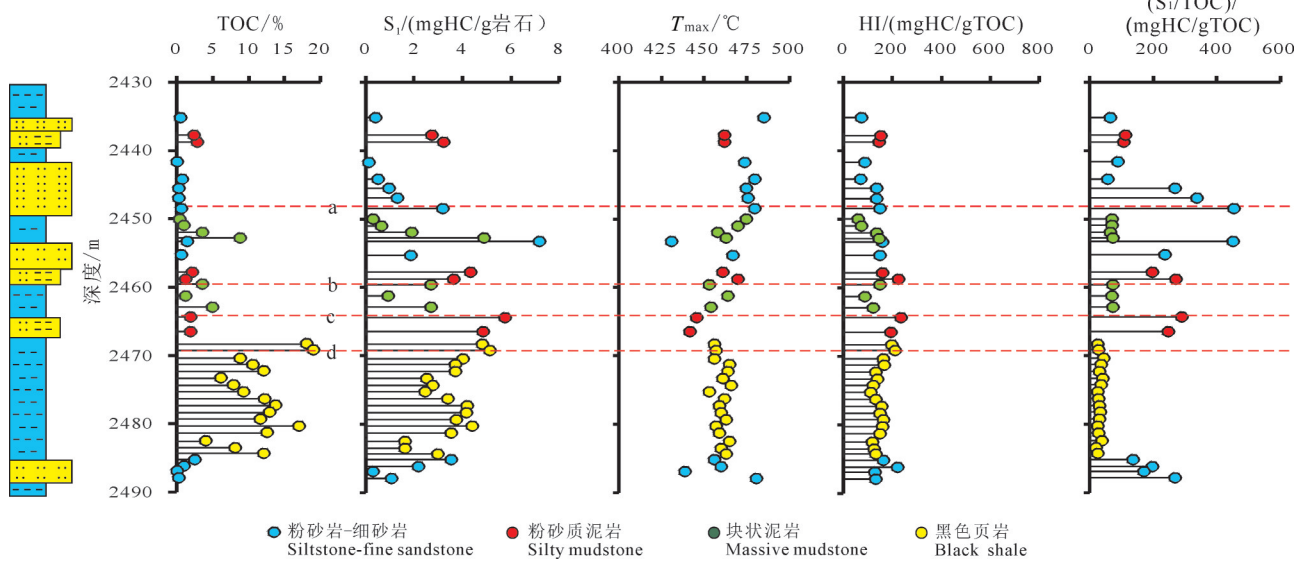


图2 H317井热解地球化学剖面(据黄振凯,2018)

Fig.2 Geochemical profile of well H317(after Huang Zhenkai et al., 2018)

泥页岩层系,因此确定适用于研究区内页岩油可动性门限所对应的OSI是评价页岩油可动性(或流动性)的重要基础。

鄂尔多斯盆地在地质历史过程中经历了异常热事件,同时还可能有隐伏岩浆体加热的叠加,导致盆地不同地区的上三叠统(长7段)烃源岩成熟演化出现较大差异(陈建平等,2014)。此外,盆地在早白垩世末期还经历了大幅度的构造抬升剥蚀(赵孟为等,1996;赵宏刚等,2005;陈瑞银等,2007;吴宝祥等,2012)。因此,埋藏深度相似的泥页岩层系的热演化程度会出现明显的差异性。鉴于上述原因,建立长7段泥页岩层系的成烃演化特征并不能简单地使用埋藏深度来成图表示。本文选用盆地不同地区261块长7段泥页岩样品的岩石热解最高峰温度(T_{max})作为热演化标尺,可以看出岩石的烃指数和生烃潜力指数(即PG/TOC: $(S_1+S_2)/TOC$,下同)随热演化程度的变化具有一定的规律性(如图3)。前人通过生烃潜力指数的演化规律确定其排油门限(Tissot et al., 1984;卢双舫等,2008,2009;陈建平等,2014)。研究过程中首先通过生烃潜力指数与 T_{max} 的关系确定长7段的排油门限,根据排油门限对应的 T_{max} 即可得到长7段排油门限对应的OSI值。由图3a可知,当 T_{max} 达到438~440℃时长7段泥页岩层系开始进入生油阶段,泥页岩中有机质开始生油,烃指数开始快速增加,当 T_{max} 达到445~450℃

时达到生油高峰,之后开始逐渐降低。由图3b可知,当 T_{max} 低于445℃时泥页岩层系生烃潜力指数基本保持不变,当 T_{max} 达到445~446℃时长7段泥页岩层系进入排油阶段,生烃潜力指数开始不断降低。如果以 T_{max} 为445~446℃作为泥页岩层系排油门限,那么将该温度范围内对应的烃指数进行系统统计后认为,长7段泥页岩排油门限(或可动性门限)所对应的OSI大致平均为70 mg/gTOC,即当泥页岩层系中含油饱和度达到70 mg/gTOC后,多余的烃类将排出泥页岩层系。

4 长7段页岩油含油性和可动性评价模板

前人通过总结Bakken组页岩油地质特征并结合其实际勘探开发情况后认为,只有当泥页岩层系的OSI超过其可动性门限,其才会具备一定的页岩油勘探开发潜力(Jarvie, 2012, 2014)。那么如果以建立的长7段泥页岩层系OSI为70 mg/gTOC作为页岩油可动性门限,那么图2中2468 m以浅的粉砂岩-细砂岩、粉砂质泥页岩及部分块状泥岩都可能具有一定的页岩油潜力。但这里需要注意的一个问题就是,砂岩等夹层其自身的TOC含量非常低,如果有少量的原油运移进入这些夹层中就会导致其具有较高的OSI值,其实际页岩油资源量可能是有限的。以美国Bakken组泥页岩层系为例,其上下

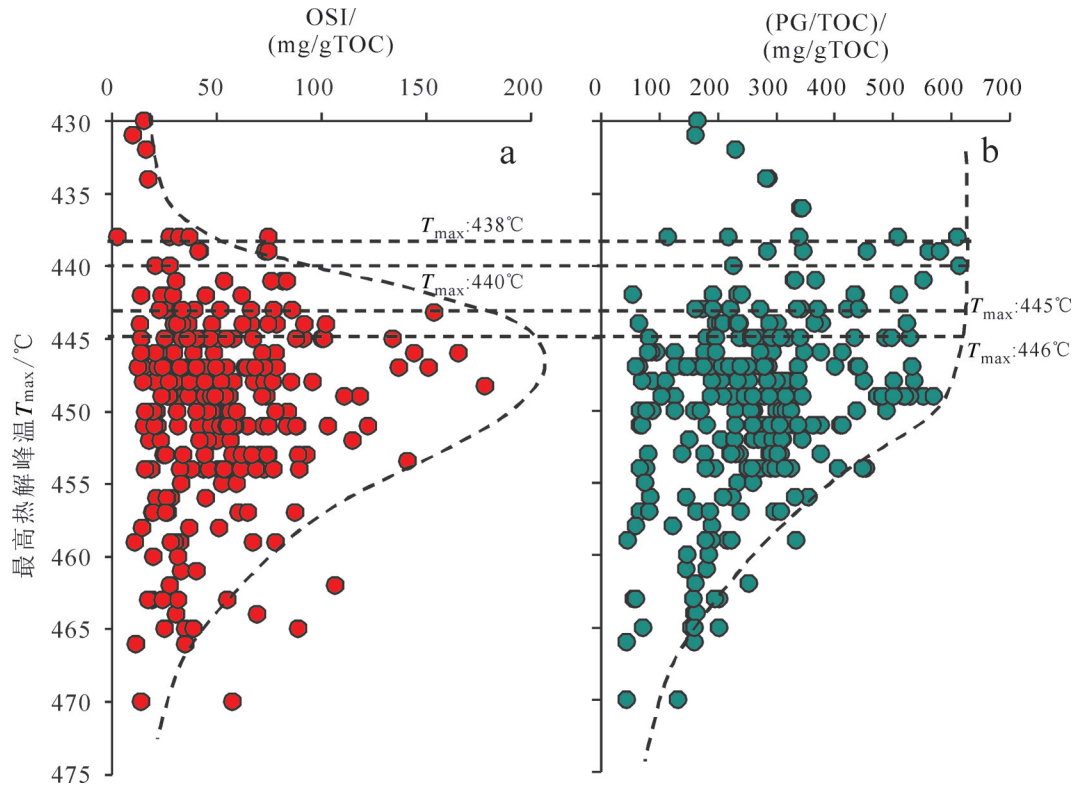


图3 长7段泥页岩OSI,PG/TOC与 T_{\max} 关系图

Fig.3 Relationships of OSI, PG/TOC and T_{\max} of source rocks in the Chang 7 member

Bakken 的 OSI 值一般低于 $<75 \text{ mg/g}$, 游离烃含量 (S_1) 为中 Bakken 的 2~3 倍, 相关分析结果认为上下 Bakken 对该区页岩油具有较高的产能贡献 (Li et al., 2015, 2018)。此外, 中国潜江凹陷盐间地层的 OSI 值多数可达数百甚至更高, 但勘探过程中发现部分游离烃含量 (S_1) 较低的地层实际上并未获得较好的油气产出 (Li et al., 2015, 2018)。因此在分析地层含油性时应将泥页岩游离烃量 S_1 和 OSI 两者结合进行综合考虑。

长7段381块TOC含量大于0.5%且处于成熟阶段泥页岩样品 (R_o : 0.8%~1.2%) 的岩石热解和有机碳数据统计具有明显的“三段性”特征: 当TOC大于8%±时, S_1 保持在稳定的高值段; TOC 低于 1.2%±时, S_1 保持在稳定的低值段; 当TOC介于 1.2%±和 8%±时, S_1 处于快速升高段。按照卢双舫等 (2012) 通过岩石热解获得其游离烃量 (S_1), 并对页岩油资源进行了分类: S_1 稳定高值段定义为页岩油的富集资源; S_1 稳定低值段为页岩油分散资源或无效资源; S_1 快速升高段为页岩油低效资源或潜在资源。页岩油分散资源与低效资源分界线对应的 S_1 值, 即 TOC

为 1.2%± 与上包络线的交点对应的 S_1 值, 大致为 1 mg/g 岩石。低效资源与富集资源的分界线为下包络线稳定段对应的 S_1 值, 大致为 3 mg/g 岩石。富集资源的上限为外包络线稳定段对应的 S_1 值, 大致为 6 mg/g 岩石。值得注意的是, 前人的分类方法主要是根据游离烃量 (S_1 , 即其绝对含油量) 对页岩油资源进行的分类, 但该分类方法中并未考虑原油可动性问题 (即可动性门限)。如果将前文建立的原油可动性门限对应的 OSI (70 mg/gTOC) 与图4结合, 则可细分为5个区域 (表1), 综合考虑样品的绝对含油量 (S_1) 和原油可动性, 将上述5个区域划分为页岩油有效资源、潜在资源和无效资源。这里需要注意的是, 由于非源岩类夹层的 TOC 含量普遍较低, 其在分类图版中的分布可能是在 TOC 低于 2% 区域内的非常狭窄部分。因此为重点揭示泥页岩样品含油性和可动性, 分类图版中并未统计非源岩夹层样品。

5 评价模板的实际应用

前人研究表明, 有利于泥页岩层系中页岩油产

表1 长7段泥页岩层系含油性综合评价表

| 区域 | S_i /(mg/g岩石) | OSI指数/(mg/gTOC) | 绝对含油量评价 | 可动性评价 | 含油性综合评价 |
|----|-----------------|-----------------|---------|-------|---------|
| 1号 | 3~6 | >70 | 含量高 | 可动性好 | 有效资源 |
| 2号 | 1~3 | >70 | 含量较高 | 可动性较好 | 有效资源 |
| 3号 | 3~6 | <70 | 含量高 | 可动性较差 | 潜在资源 |
| 4号 | 1~3 | <70 | 含量较高 | 可动性较差 | 无效资源 |
| 5号 | <1 | <70 | 含量低 | 可动性差 | 无效资源 |

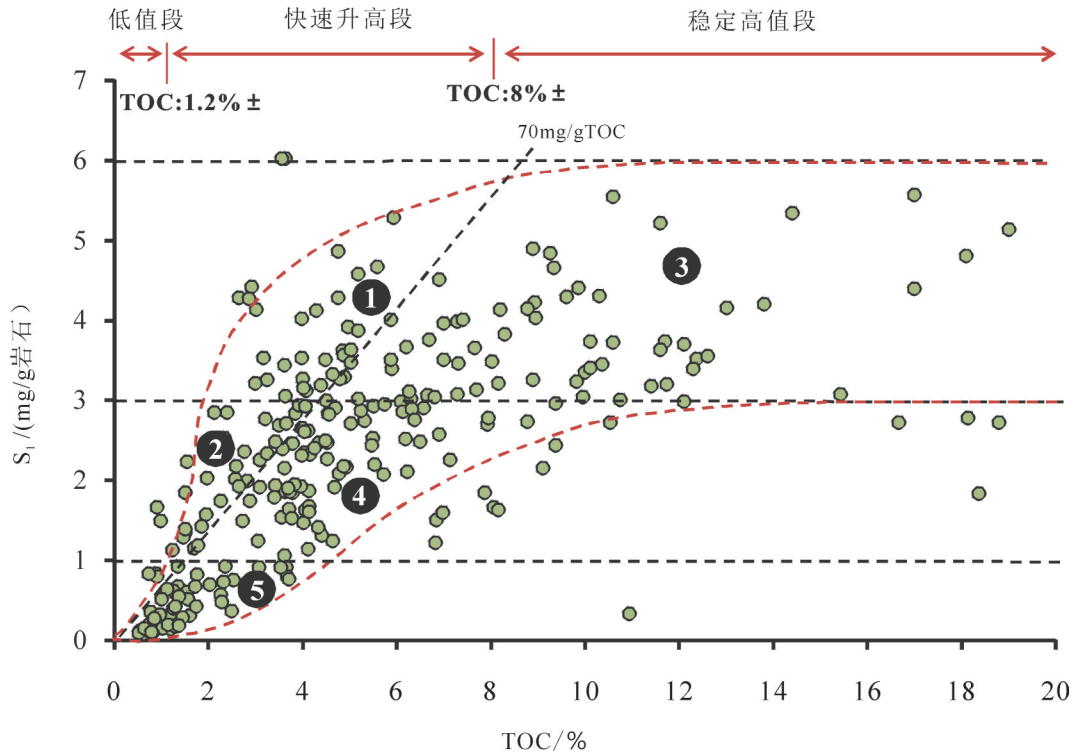


图4 长7段泥页岩样品 TOC 与 S_i 关系图
Fig.4 Relationships of TOC and S_i of source rocks in the Chang 7 Member

出的镜质体反射率大致在 1.0%~1.1%(Jarvie, 2012, 2014; 黎茂稳等, 2018)。因此在对页岩油含油性评价模板的实际地质应用过程中选用 R_o 为 1.1% 的 H317 井长 7 段泥页岩层段作为应用实例。

将 H317 井不同岩性(图 2a~d)的热解、有机碳数据投点在该模板(图 5)中后发现大部分粉砂岩-细砂岩、粉砂质泥岩样品多位于 1 号和 2 号区域, 即 S_i 介于 1~6 mg/g, OSI 指数均高于 70 mg/gTOC; 部分块状泥岩位于 2 号区域, 即 S_i 介于 1~3 mg/g, OSI 高于 70 mg/gTOC; 大部分黑色页岩样品位于 3 号区域, 即 S_i 介于 3~6 mg/g, OSI 低于 70 mg/gTOC; 少量位于 4 号区域, 即 S_i 介于 1~3 mg/g, OSI 低于 70 mg/gTOC。选取不同区域中不同岩性样品滞留油抽提

物四组分含量特征差异明显(图 6), 处于模板 1 号和 2 号区域的粉砂岩-细砂岩、粉砂质泥岩及部分块状泥岩滞留油的饱和烃和芳香烃含量明显高于处于 3 号和 4 号区域的黑色页岩。粉砂岩-细砂岩的饱和烃和芳香烃含量分别为 85% 和 6.5%, 占比将近 92%; 粉砂质泥岩饱和烃和芳香烃含量分别为 81.4% 和 3.0%, 占比将近 85%; 部分块状泥岩饱和烃和芳香烃含量分别为 66% 和 18.6%, 占比将近 85%; 黑色页岩饱和烃和芳香烃含量分别为 32.1% 和 21.5%, 占比将近 54%, 非烃及沥青质含量分别为 28.5% 和 17.9%, 占比将近 46%。从组分含量特征上来看, H317 井中处于 1 号和 2 号区域的粉砂岩-细砂岩、粉砂质泥岩及部分块状泥岩滞留油的轻质组

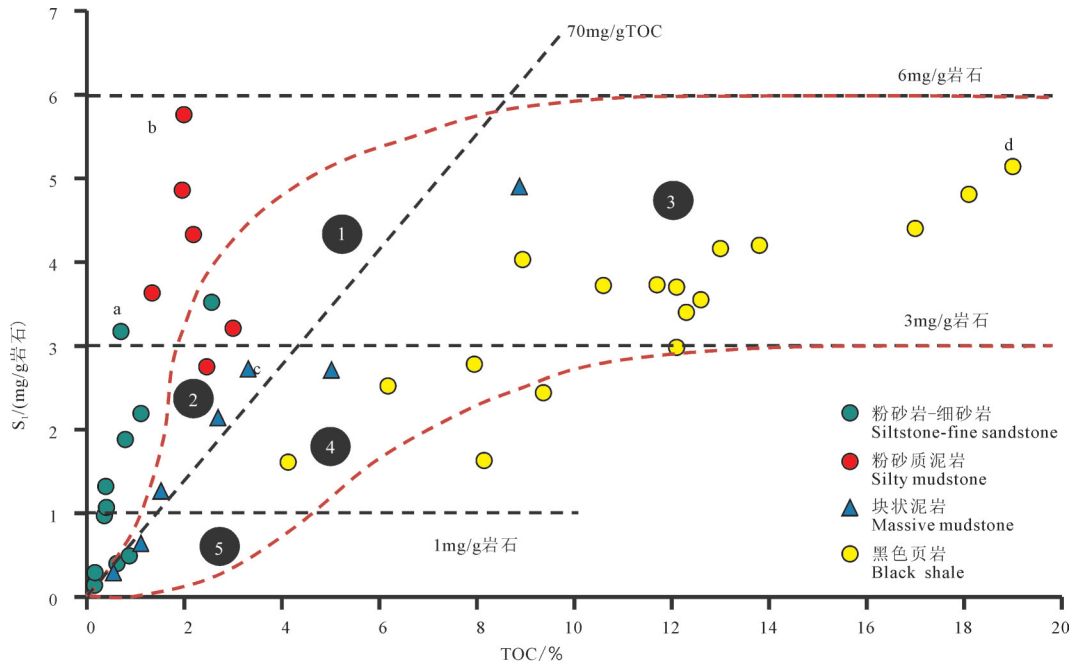


图5 H317井典型样品在页岩油含油性评价模板投点图
Fig.5 Point chart of typical samples of well H317 in shale oil-bearing evaluation template

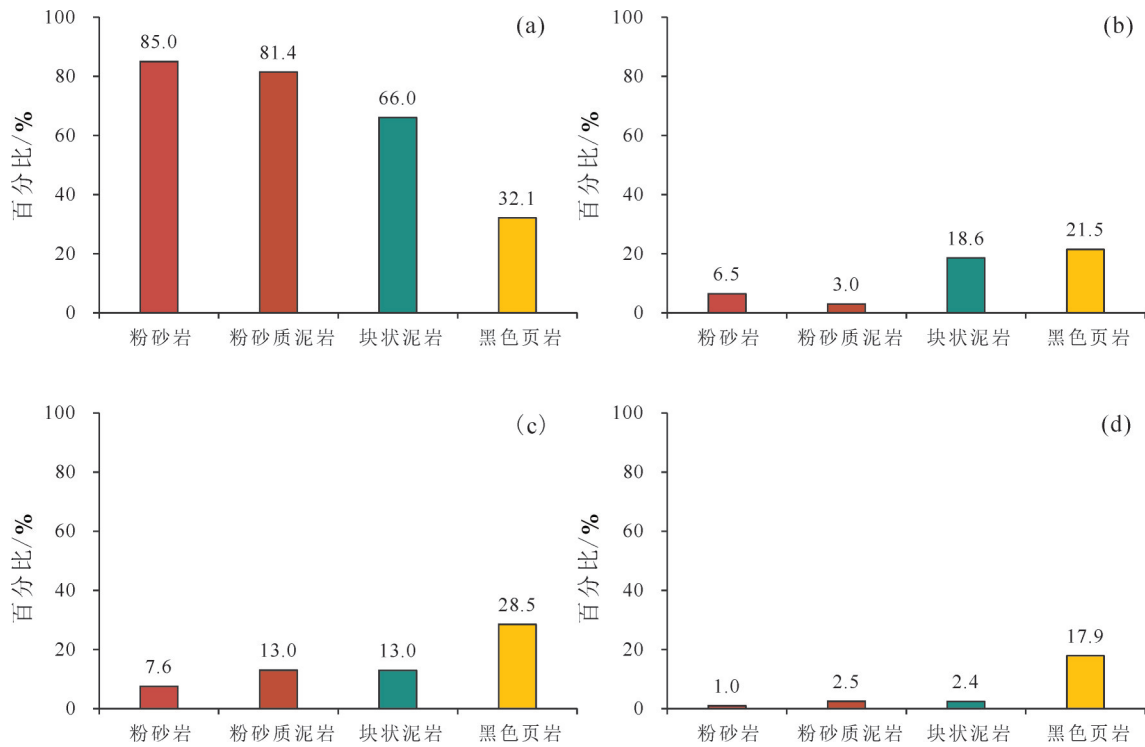


图6 H317井长7段泥岩层段不同岩性样品抽提物四组分特征
a—饱和烃;b—芳香烃;c—非烃;d—沥青质
Fig.6 Component characteristics of extracts from different lithological samples of the Chang 7 Member of Well H317
a-Saturated hydrocarbon; b-Aromatic hydrocarbon; c-Non-hydrocarbon; d-Asphaltene

分明显高于主体处在3号区域的黑色页岩。

结合前人关于该套地层油气相态、气油比及模拟实验等研究认识(白玉彬等,2012;周文等,2013; Li et al., 2018),初步认为:H317井中处于1号和2号区域中的长7段泥页岩层系中粉砂岩-细砂岩及粉砂质泥岩中的滞留油整体含油量和流动性较好,其可以作为页岩油勘探开发的有效资源和有利目标,这与该区前期勘探及相关认识基本一致(杨华等,2015)。块状泥岩中的烃类组分偏轻,且以单一油相为主,气油比相对较低,残留有机质和黏土矿物等对其吸附作用的强度要弱于黑色页岩(Li et al., 2015, 2018),其内部滞留油的流动性要强于黑色页岩,其可作为页岩油勘探的潜在资源和目标。相比之下,黑色页岩中的滞留油的含油性较好但可流动性较差,其内部滞留油不能按照前述两种主要岩性中的页岩油勘探开发方式进行开采。

笔者认为导致H317井长7段黑色页岩中含油性及滞留油可动性较差原因有两个方面:首先,H317井黑色页岩有机质类型以I型为主,当前的热演化程度(R_o 为1.1%±)对应的排烃效率在50%~70%(黄振凯等,2018),表明其在地质历史过程中已经发生过排烃,部分(易于流动的组分)进入了上覆的粉砂岩-细砂岩、粉砂质泥岩、块状泥岩中。当前残留的烃类OSI平均仅有31 mg/gTOC,远低于前文建立的长7段泥页岩层段的排油门限(或可动性门限)70 mg/gTOC,也就是说目前残留的烃类量尚未满足泥页岩自身的容留和吸附,无法向外运移和排驱;第二,地球化学剖面(图2)可知黑色页岩段的有机质丰度普遍较高,从相似相溶的角度来看,高有机质丰度对滞留烃类也具有一定的吸附作用,加之页岩中黏土矿物也会对滞留烃类产生吸附,因此导致其可动性变差。

综上所述认为,H317井泥页岩层系在当前热演化程度下,虽然其内部滞留了30%~50%的烃类,但在综合考虑其体系中不同岩性的含油性、可动性、滞留油组分含量特征及气油比等地质因素后认为,H317井长7段泥页岩层系中的非源岩夹层段及部分块状泥岩可作为页岩油的有效资源和有利勘探目标。黑色页岩的含油性较好,但其OSI较低,原油可动性较差,针对这类岩性可采取如油页岩原位开采等工程技术手段,其可作为页岩油勘探开发的潜

在资源。

6 结 论

通过长7段泥页岩层系大量烃源岩样品的实际地质统计,建立了其生、排油模式,并认为长7段页岩油的可动门限(排烃门限)在70 mg/gTOC,并以此为基础建立了适用于鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系页岩油含油性和可动性评价模板。评价模板中将该区页岩油划分为有效资源、潜在资源和无效资源三大类。

本文以H317井位实际地质应用实例,使用评价模板对其不同岩性进行了系统分类。H317井长7段泥页岩层系中非源岩夹层段及部分块状泥岩等可作为页岩油勘探开发的有效资源和有利目标,黑色页岩中的含油性较好,但可流动性较差,针对这类岩性可采取如油页岩原位开采等工程技术手段,其可作为页岩油勘探开发的潜在资源。

References

- Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, Liu Peng. 2012. Control effect of high-quality source rocks on petroleum accumulation in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition)*, 27(2):1-5 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jianping, Sun Yongge, Zhong Ningning, Huang Zhenkai, Deng Chunping, Xie Liujuan, Han Hui. 2014. The efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within geological frame[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2005-2032 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun. 2007. Thermal anomaly and thermal evolution of source rocks in Mesozoic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34(6):658-663 (in Chinese with English abstract).
- Er Chuang, Luo Anxiang, Zhao Jingzhou, Zhang Zhongyi, Bai Yubin, Cheng Dangxing. 2016. Lithofacies features of organic-rich shale of the Triassic Yanchang Formation in Huachi area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2):108-117 (in Chinese with English abstract).
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Fan Hao, Shen Wuxian. 2013. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 34(5): 708-716 (in Chinese with English abstract).
- Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinwei, Pang Jinlian, Liu Guangdi, Zhang Xuefeng. 2013. Characteristics and resource potential of the oil shale of Chang 7 Layer in Longdong area, Ordos basin[J]. *Earth*

- Science Frontiers, 20(2):140–146 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Liu Quanyou, Li Maowen, Chen Jianping. 2018. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 39(3):513–521 (in Chinese with English abstract).
- Jarvie D M. 2012. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: Shale-oil resource systems[J]. AAPG Memoir, 97:89–119.
- Jarvie D M. 2014. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems[J]. Geologica Acta, 12(4):307–325.
- Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, Li Denghua, Zheng Min. 2012. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 33(3):343–350 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chengfu, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Wan Yongping, Lei Yuhong, Sun Jianbo. 2013. Geological characteristics shale gas in 7th member of shale and exploration of Yanchang Formation, potential of continental southeast Ordos Basin[J]. Geology in China, 40(6):1880–1888 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun. 2012. Origin, types and distribution characteristics of shale oil in China[C]// Wuxi: International Symposium on Shale Oil Exploration Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Jijun, Liu Zhao, Li Junqian, Lu Shuangfang, Zhang Tongqian, Zhang Xinwen, Yu Zhiyuan. 2018. Fractal characteristics of continental shale pores and its significance to the occurrence of shale oil in China: A case study of Biyang Depression [J]. Fractals, 26(2):1840008.
- Li Jijun, Wang Weiming, Cao Qun, Shi Yinglin, Yan Xintong. 2015. Impact of hydrocarbon expulsion efficiency of continental shale upon shale oil accumulations in eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 59:467–479.
- Li Maowen. 2017. Reflections on the occurrence and accumulation of shale oil[C]// The 7th China Petroleum Geology Annual Conference, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li Maowen. 2018. Advances in the Research on Oil Enrichment Mechanism of Terrestrial Shale in Sinopec Exploration Area[C]// China Oil & Gas Exploration Engineering Technology Forum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, Li Jijun, Wang Min, Xue Haitao, Wang Weiming. 2012. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 39(2):249–256 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Li Jiaona, Liu Shaojun, Feng Zihui, Li Jingkun, Huo Qiuli, Wang Xue, Xue Haitao. 2009. Oil generation threshold depth of Songliao Basin: Revision and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 36(2):166–173 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang. 2018. Oil and Gas Geochemistry[M]. Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Ran Ye, Wang Guiwen, Zhou Zhenglong, Lai Jin, Dai Quanqi, Chen Jing. 2016. Identification of lithology and lithofacies type and its application to Chang 7 tight oil in Heshui area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 43(4):1331–1340 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ningliang, Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Hao Bing, Luo Ke, Qu Junli, Liu Chuang, Yang Guanqun, Cao Mengchun. 2019. Provenance analysis and thermal evolution of Upper Triassic Yanchang Formation in the Southern Ordos Basin[J]. Geology in China, 46(3):537–556 (in Chinese with English abstract).
- Tissot B P, Welte D H. 1984. Petroleum Formation and Occurrence[M]. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wang Xiangzeng, Gao Chao. 2014. The hydrocarbon generation process of the Mesozoic Chang 7 lacustrine shale in south of Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, (1):2–10 (in Chinese with English abstract).
- Wu Baoxiang, He Jinxian, Zhang Xiaoli, Xu Li, Xia Jia. 2012. Analysis of burial evolution of stratum and oil-gas reservoirs formation in Ordos basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 36(6):8–13 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. 2013. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(1):1–11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Zhang Wenzheng. 2015. 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]. Geochimica, 34(2):147–154 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, Tang Xuan, Zhu Liangliang, Xing Yawen. 2012. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 19(5):322–331 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, Ma Jun. 2006. 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, 33(3):289–293 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, Wu Kai, Liu Fei. 2015. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geochimica, 44(5):505–515 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, Kong Qingfen, Wu Kai. 2008. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 37(1):59–64 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Honggang. 2005. The relationship between tectonic-thermal evolution and sandstone-type uranium ore-formation in Ordos basin[J]. *Uranium Geology*, 21(5): 275-282(in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengwei, Behr. 1996. Vitrinite reflectance in Triassic with relation to geothermal history of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 17(2):15-23 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wen, Chen Wenling, Deng Kun, Deng Hucheng, Wang Hao, Zhou Qiumei. 2013. Determination of oil/gas phase in continental shale: Taking Member Chang 7 shale of Yanchang Formation in Ordos Basin for example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 40(6):640-647 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dingwei, Wang Xiangzeng, Ding Wenlong, Zhang Lixia, Jiang Chengfu. 2013. Application of logging data in the identification of high quality shale gas reservoirs: An example from the Chang-7 black shale in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 28(2):25-29 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Wu Songtao. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 14-26 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 白玉彬,赵靖舟,方朝强,刘鹏. 2012. 优质烃源岩对鄂尔多斯盆地延长组石油聚集的控制作用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 27(2):1-5.
- 陈建平,孙永革,钟宁宇,黄振凯,邓春萍,谢柳娟,韩辉. 2014. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J]. *地质学报*, 88(11):2005-2032.
- 陈瑞银,罗晓容,赵文智,王红军. 2007. 鄂尔多斯盆地中生代热异常及烃源岩热演化特征[J]. *石油勘探与开发*, 34(6):658-663.
- 耳闯,赵靖舟,白玉彬,樊豪,沈武显. 2013. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 34(5):708-716.
- 耳闯,罗安湘,赵靖舟,张忠义,白玉彬,程党性. 2016. 鄂尔多斯盆地华池地区三叠系延长组长7段富有机质页岩岩相特征[J]. *地学前缘*, 23(2):108-117.
- 高岗,刘显阳,王银会,庞锦莲,柳广弟,张雪峰. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J]. *地学前缘*, 20(2):140-146.
- 黄振凯,刘全有,黎茂稳,陈建平. 2018. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J]. *石油与天然气地质*, 39(3):513-521.
- 贾承造,邹才能,李建忠,李登华,郑民. 2012. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. *石油学报*, 33(3): 343-350.
- 金之钧. 2012. 中国页岩油成因、类型与分布特征[C]. 无锡:页岩油勘探技术国际研讨会.
- 姜呈馥,王香增,张丽霞,万永平,雷御红,孙健博. 2013. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. *中国地质*, 40(6):1880-1888.
- 黎茂稳. 2017. 有关页岩油赋存富集的几点思考[C]//北京:第七届中国石油地质年会.
- 黎茂稳. 2018. 中国石化探区陆相页岩油富集机理研究进展[C]. 北京:中国油气勘探开发工程技术论坛.
- 卢双舫. 2008. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社.
- 卢双舫,李娇娜,刘绍军,冯子辉,李景坤,霍秋立,王雪,薛海涛. 2009. 松辽盆地生油门限重新厘定及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 36(2): 166-173.
- 卢双舫,黄文彪,陈方文,李吉君,王民,薛海涛,王伟明. 2012. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 39(2):249-256.
- 冉冶,王贵文,周正龙,赖锦,代全齐,陈晶. 2016. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油岩性岩相类型识别及其应用[J]. *中国地质*, 43(4): 1331-1340.
- 孙宁亮,钟建华,倪良田,郝兵,罗可,曲俊利,刘闯,杨冠群,曹梦春. 2019. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组物源分析及热演化[J]. *中国地质*, 46(3):537-556.
- 王香增,高潮. 2014. 鄂尔多斯盆地南部长7陆相泥页岩生烃过程研究[J]. *非常规油气*, (1):2-10.
- 吴保祥,何金先,张晓丽,徐丽,夏嘉. 2012. 鄂尔多斯盆地地层埋藏演化与油气成藏分析[J]. *东北石油大学学报*, 36(6):8-13.
- 杨华,张文正. 2015. 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*, 34(2):147-154.
- 杨华,李士祥,刘显阳. 2013. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 34(1):1-11.
- 张金川,林腊梅,李玉喜,唐玄,朱亮亮,邢雅文. 2012. 页岩油分类与评价[J]. *地学前缘*, 19(5):322-331.
- 赵孟为, Behr. 1996. 鄂尔多斯盆地三叠系镜质体反射率与地热史[J]. *石油学报*, 17(2):15-23.
- 赵宏刚. 2005. 鄂尔多斯盆地构造热演化与砂岩型铀成矿[J]. *铀矿地质*, 21(5):275-282.
- 周文,陈文玲,邓昆,邓虎成,王浩,周秋媚. 2013. 陆相页岩油气地质油气相态的确定方法初探——以鄂尔多斯盆地延长组长7段为例[J]. *成都理工大学学报(自科版)*, 40(6):640-647.
- 张文正,杨华,李剑锋,马军. 2006. 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*, 33(3):289-293.
- 张文正,杨华,杨奕华,孔庆芬,吴凯. 2008. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. *地球化学*, 37(1):59-64.
- 张文正,杨华,杨伟伟,吴凯,刘飞. 2015. 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价[J]. *地球化学*, 44(5):505-515.
- 朱定伟,王香增,丁文龙,张丽霞,姜呈馥. 2013. 测井资料在优质页岩气储层识别中的应用——以鄂尔多斯盆地东南部长7段黑色页岩为例[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 28(2):25-29.
- 邹才能,杨智,崔景伟,朱如凯,侯连华,陶士振,袁选俊,吴松涛. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. *石油勘探与开发*, 40(1): 14-26.