

引用格式:代波,李二党,王小军,等.基于烃源岩地化参数评价页岩油运聚规律[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):506-513.

DAI Bo, LI Erdang, WANG Xiaojun, et al. Evaluation of shale oil migration and accumulation rules based on geochemical parameters of source rocks[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 506-513.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.005

## 基于烃源岩地化参数评价页岩油运聚规律

代波<sup>1</sup>,李二党<sup>1</sup>,王小军<sup>1</sup>,曹丽<sup>1</sup>,马雄<sup>1</sup>,臧起彪<sup>2,3</sup>

(1. 中国石油长庆油田分公司第一采油厂,陕西延安 716000;2. 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;3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

**摘要:**选取鄂尔多斯盆地安塞地区长7段地层烃源岩为研究对象,利用总有机碳含量测试、岩石热解和色谱质谱等技术,深入探讨页岩油在运移和聚集过程中的差异化特征。结果显示:研究区不同烃源岩生烃潜力差异较大,其中,页岩的生烃能力最强,泥质砂岩的生烃潜力最弱。泥质砂岩中游离烃含量较高是由于其接受了外来的游离烃。不同岩性中页岩油的地球化学参数分布具有差异性,其中泥质砂岩富含饱和烃组分,非烃/沥青质组分较少,而页岩和泥岩则富含非烃/沥青质组分,饱和烃组分较少。原油性质和源储厚度及物性对页岩油的排运聚对页岩油运聚具有较强的影响。小分子烃类组分和薄层烃源岩内的页岩油较易运移,大分子烃类组分和厚层烃源岩内的页岩油倾向于残留在源岩内部。

**关键词:**页岩油;饱和烃;运聚特征;主控因素;安塞地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

### Evaluation of shale oil migration and accumulation rules based on geochemical parameters of source rocks

DAI Bo<sup>1</sup>, LI Erdang<sup>1</sup>, WANG Xiaojun<sup>1</sup>, CAO Li<sup>1</sup>, MA Xiong<sup>1</sup>, ZANG Qibiao<sup>2,3</sup>

(1. No. 1 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Taking the source rock of Chang 7 Member in Ansai area of Ordos Basin as the research object, the differentiation characteristics of shale oil in the process of migration and accumulation are discussed in depth through a series of testing methods, such as TOC test, rock pyrolysis and chromatography-mass spectrometry. The results show that the hydrocarbon generation potential of different source rocks in the study area is quite different. The shale has the strongest hydrocarbon generation capacity, while that of the interaction layer of sandstone and mudstone is the weakest. The high content of free hydrocarbon in interaction layer of sandstone and mudstone results from the receipt of external free hydrocarbon. The distribution of geochemical parameters of shale oil in different lithology is different. Among them, the sand mud interaction layer is rich in saturated hydrocarbon but relatively poor in nonhydrocarbon and asphaltene, while the shale and the mudstone are rich in nonhydrocarbon and asphaltene but relatively poor in saturated hydrocarbon. The properties of crude oil, thickness of source reservoir and physical properties have effects on shale oil migration and accumulation. Shale oil in thin-layer source rocks and small molecular hydrocarbon components are easy to migrate. Shale oil in thick-layer source rocks and macromolecular hydrocarbon components tend to remain in the source rocks.

**Keywords:** shale oil, saturated hydrocarbon, migration and accumulation characteristics, main control factor, Ansai area

收稿日期:2020-09-18。

第一作者简介:代波(1987—),男,本科,工程师,主要从事油田地质与开发方面的工作。地址:陕西省延安市宝塔区河庄坪镇长庆油田分公司第一采油厂,邮政编码:716000。E-mail: cqytdb@126.com

通信作者简介:臧起彪(1991—),男,在读博士研究生,主要从事非常规油气评价工作。地址:北京市昌平区府学路中国石油大学,邮政编码:102249。E-mail: 1448906535@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目“咸化湖盆条件下盐类对地层超压的作用机制研究”(41872127)。

随着常规油气资源的消耗和全球油气资源需求的不断增长,页岩油资源的勘探逐步受到众多专家和学者们的关注。页岩油是指赋存于有效烃源岩中的非气态烃类,所赋存的主体也包含烃源岩夹层中的致密砂岩和石灰岩等<sup>[1-3]</sup>。页岩油运移和聚集特征的研究对页岩油资源的勘探和评价至关重要<sup>[4-8]</sup>。页岩油的分布特征与其运移和聚集规律密切相关,同时,页岩油复杂的性质和其储层强非均质性特征也决定了其在运移和聚集过程中的复杂性<sup>[6-11]</sup>。一些专家和学者常从运移通道的角度来分析页岩油的运聚特征<sup>[5,7,10]</sup>,如罗晓容等<sup>[5]</sup>分析了输导层非均质性与页岩油运聚特征的关系。刘庆等<sup>[10]</sup>研究了微裂缝发育特征对页岩油运移的影响。研究发现烃源岩地球化学特征不仅是评价烃源岩特征的有效参数,而且能够很好地反映地质历史过程中油气的变化规律<sup>[9-13]</sup>,因此,可以将其用于评价页岩油运移和聚集规律。安塞地区长7段地层富含大量的页岩油资源,其中泥质砂岩、泥岩和页岩皆是具有生烃能力的有效烃源岩,为上下层段提供了大量的油气资源。因此,以安塞地区长7段为例,通过对比不同烃源岩地球化学参数特征,来研究页岩油的运聚规律及其控制因素,可为页岩油资源勘探和评价以及分布提供理论依据。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是重要的含油气盆地之一,包括

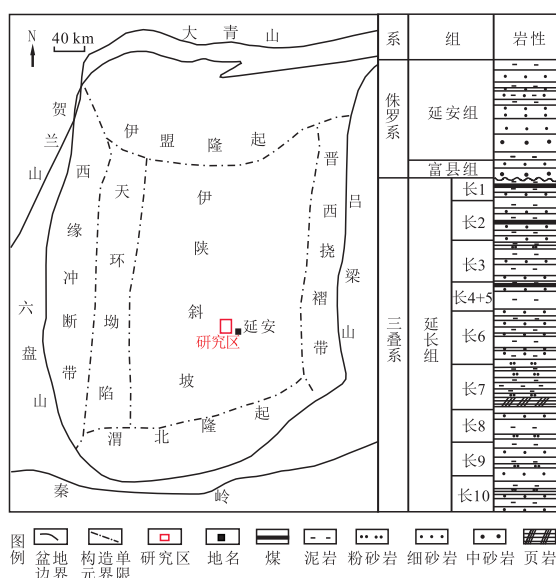


图1 安塞地区构造位置与地层发育情况

Fig. 1 Tectonic location and stratum development in Ansai area

伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷和西缘冲断带六个一级构造单元(图1)<sup>[14-17]</sup>。研究区位于伊陕斜坡中南处。伊陕斜坡为向斜构造,其东部宽缓,西部窄陡,呈现出两翼不对称的构造特征<sup>[14,17-18]</sup>。安塞地区长7段地层为典型的三角洲前缘沉积体系,地层厚度主要在60~90 m,发育有水下分流河道、分流间湾、和河口坝等沉积微相,区内岩性相对单一,主要岩性为泥岩、页岩和细粉砂岩<sup>[14,17,19-20]</sup>。研究区烃源岩厚度在0~40 m,由东北向西南方向,由于受到沉积环境影响,烃源岩厚度由北向南具有逐渐增大的趋势,区内砂体和烃源岩互层叠置分布,砂岩储层和烃源岩直接接触,因此,使得研究区内发育丰富的页岩油资源。

## 2 样品和实验

### 2.1 样品概况

对鄂尔多斯盆地安塞地区D199井不同深度和不同岩性的样品系统取样,进行有机地球化学分析,共选取样品24块,岩性包括泥岩、页岩和泥质砂岩。将样品进行编号A1, A2, ..., A23, A24,以便进行总有机碳含量测试、岩石热解、族组分分析以及饱和烃分析实验。实验样品取心位置及岩性见图2。

### 2.2 实验方法介绍

该次研究有关的烃源岩地球化学分析实验均在东北石油大学(大庆)实验室完成。总有机碳含量的检测、岩石热解和色谱质谱测试分别由Vario TOC型有机碳分析仪、Rock-Eval型热解仪和5975MSD型色谱质谱联用仪完成。

总有机碳含量分析:先将岩石碾磨成小于100目的粉末,然后配置5%的稀盐酸溶液与粉末样品同置于通风柜中通风3 d,再将样品放置于65℃的保温箱干燥3 d,最后将样品进行称重后置于锡箔中包装并放置仪器中分析。

岩石热解分析:称取大约50~100 mg小于100目的样品并置于样品坩埚内,样品最先进入热解炉并进行裂解。裂解后的部分样品进入FID(氢火焰离子化)检测器并测定游离烃、热解烃以及最高峰温等参数,部分样品可进入红外检测器测定其他组分。族组分主要是利用试剂对组分进行分离。色谱质谱测试是通过载气将试样带入色谱柱中,使其中

的各组分产生分离,然后再根据色谱图对化合物进行研究分析。

### 3 不同烃源岩地球化学特征

TOC(总有机碳含量)、 $S_1$ (可溶烃含量)、 $S_2$ (热解

烃含量)、 $S_1/TOC$ 和 $S_2/TOC$ 等指标是评价烃源岩特征的基本地球化学参数<sup>[3,7,21-22]</sup>。实验分析结果显示,安塞地区长7段页岩的TOC平均值为4.97%, $S_2$ 平均值为11.82 mg/g, $S_1$ 平均值为5.08 mg/g;泥岩的TOC平均值为3.15%, $S_2$ 平均值为6.44 mg/g, $S_1$ 平均值为3.04 mg/g;泥质砂岩的TOC平均值为1.29%, $S_2$ 平均值为1.88 mg/g, $S_1$ 平均值为3.67 mg/g;这说明研究区页岩烃源岩的生烃能力大于泥岩烃源岩,而泥质砂岩生烃能力最弱(表1)。

统计结果显示,泥质砂岩 $S_1/TOC$ 值最大,分布范围为190.19~544.33 mg/g,平均值为312.46 mg/g;泥岩 $S_1/TOC$ 值最小,分布范围为27.17~249.36 mg/g,平均值为105.83 mg/g;页岩 $S_1/TOC$ 值介于两者之间,平均值为136.24 mg/g。泥岩和页岩中,外来烃类较少,其 $S_1/TOC$ 基本代表了自身生成的游离烃含量。而泥质砂岩的 $S_1/TOC$ 基本代表自身生成的游离烃含量和外来游离烃两部分,由于外来烃类较多,使得泥质砂岩的 $S_1/TOC$ 平均值较高,因此,泥质砂岩的TOC相对较小, $S_1/TOC$ 却最大。

研究区烃源岩有机质类型以II<sub>1</sub>型和II<sub>2</sub>型为主,其中页岩 $S_2/TOC$ 值最大,分布范围为113.08~388.66 mg/g,平均值为256.92 mg/g,主要为II<sub>1</sub>型;泥质砂岩 $S_2/TOC$ 值最小,分布范围为60.98~204.21 mg/g,平均值为134.60 mg/g,主要为II<sub>2</sub>型;泥岩 $S_2/TOC$ 值介于两者之间,平均值为234.18 mg/g,以II<sub>1</sub>型和II<sub>2</sub>型为主,这与其有机质碳含量的高低具有良好的对应关系。

总有机碳含量与烃源岩的生烃潜力有关<sup>[21]</sup>。通

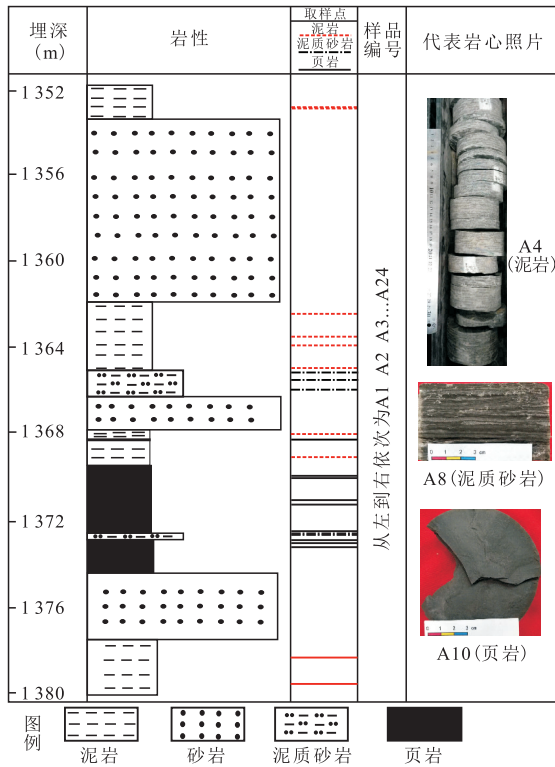


图2 鄂尔多斯盆地安塞地区D199井柱状图及样品取心位置

Fig. 2 Histogram and coring position of Well-D199 in Ansai area, Ordos Basin

表1 D199井不同岩性基本地化特征对比

Table 1 Comparison of basic geochemical characteristics of different lithology of Well-D199

岩性		TOC(%)	$S_1$ (mg/g)	$S_2$ (mg/g)	$S_1+S_2$ (mg/g)	$\frac{S_1}{S_1+S_2}$ (mg/g)	$\frac{S_1}{TOC}$ $10^2$ (mg/g)	$\frac{S_2}{TOC}$ $10^2$ (mg/g)	$\frac{S_1+S_2}{TOC}$ $10^2$ (mg/g)
页岩	最大	10.81	8.80	28.65	32.41	0.49	254.66	388.66	643.32
	最小	1.63	1.13	28.65	8.44	0.09	27.90	113.08	147.80
	平均值	4.97	5.08	11.82	16.90	0.32	136.24	256.92	393.17
泥岩	最大	9.86	7.78	12.14	17.51	0.62	249.36	274.32	530.08
	最小	1.76	0.50	4.30	4.80	0.10	27.17	123.12	177.59
	平均值	3.15	3.04	6.44	9.49	0.29	105.83	234.18	340.01
泥质砂岩	最大	2.14	5.28	4.37	8.44	0.82	544.33	204.21	732.99
	最小	0.88	2.70	0.63	3.45	0.48	190.19	60.98	280.49
	平均值	1.29	3.67	1.88	5.55	0.70	312.46	134.60	447.06

通过对安塞地区长7段地层烃源岩实验结果分析发现,其TOC与S<sub>2</sub>、S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>呈较好的正相关关系,相关系数分别为0.67和0.65(图3a、图3b)。但是,TOC与S<sub>1</sub>几乎没有相关性,其相关系数小于0.1(图3c),这是由于研究区烃源岩品质较高,热演化程度却仅处于生油早期,导致S<sub>2</sub>远大于S<sub>1</sub>,因而S<sub>2</sub>的变化趋势与S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>的变化趋势大体一致。

## 4 不同岩性中页岩油地球化学特征

### 4.1 基本组分特征

烃类组分(主要是饱和烃、芳香烃以及非烃/沥青质)可判识页岩油在不同岩性中的运聚集特征<sup>[3]</sup>。D199井泥质砂岩中饱和烃组分的平均相对含量为70.58%,芳香烃组分的平均相对含量为5.72%,非烃/沥青质组分的平均相对含量为23.72%;泥岩中饱和烃、芳香烃和非烃/沥青质的平均相对含量分别为45.81%、15.45%和38.74%;页岩中饱和烃、芳香烃和非烃/沥青质组分的平均相对含量分别为43.51%、

10.00%和46.48%(表2)。

泥质砂岩富含饱和烃组分,而非烃/沥青质组分较少;页岩和泥岩则富含非烃/沥青质组分,而饱和烃组分较少。在饱和烃、芳香烃以及非烃/沥青质三端元图版上,不同岩性的样品表现出良好的分异现象,页岩位于右边,泥质砂岩位于右上方(图4)。

### 4.2 饱和烃特征

由于样品来自同一口井,加之埋深差别不大,所以样品大致处于同一沉积环境,因而其各项生标参数数值变化不大。尽管如此,生标参数特征在不同岩性之间仍具有一定的差异性。对研究区15个样品的正构烷烃(碳数11-21、碳数22-30、碳数31-39的正构烷烃含量)分布结果进行统计分析得出,页岩n-C<sub>11-21</sub>、n-C<sub>22-30</sub>和n-C<sub>31-39</sub>数值范围分别为46.3%~50.8%、44.2%~48.1%和4.6%~5.9%,平均值分别为48.7%、45.9%和5.3%;泥岩n-C<sub>11-21</sub>、n-C<sub>22-30</sub>和n-C<sub>31-39</sub>数值分别为41.4%~46.5%、48.9%~52.1%和4.6%~6.5%,平均值分别为44.0%、50.4%和

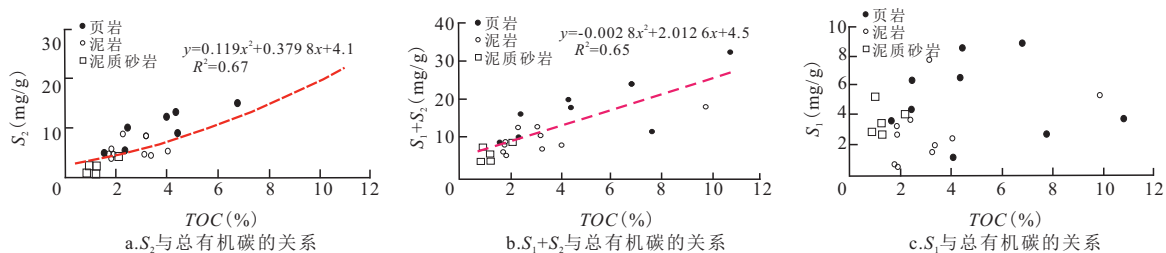


图3 岩石热解参数与总有机碳的关系

Fig. 3 Relation between rock pyrolysis parameters and TOC

表2 D199井不同岩性的抽提物组成特征对比

Table 2 Comparison of composition characteristics of extracts of different lithology of Well-D199

岩性	抽提物 岩石 (mg/g)	重量(mg/g)				重量比(%)			
		饱和烃	芳香烃	非烃	沥青	饱和烃	芳香烃	非烃+沥青	
页岩	平均值	6.59	2.98	0.64	0.17	2.80	43.51	10.00	46.48
	最大	10.25	4.72	1.83	0.39	6.23	64.20	28.20	65.50
	最小	2.31	0.50	0.20	0.05	1.25	11.40	2.70	22.00
泥岩	平均值	6.65	3.17	0.92	0.33	2.23	45.81	15.45	38.74
	最大	10.36	6.83	1.81	0.97	3.53	70.80	39.50	51.40
	最小	2.13	0.41	0.11	0.05	0.57	16.00	1.40	24.50
泥质砂岩	平均值	7.64	5.20	0.45	0.25	1.75	70.58	5.72	23.72
	最大	10.11	6.19	0.98	0.59	3.34	81.20	9.70	37.20
	最小	4.64	3.67	0.28	0.06	0.61	56.30	3.40	14.00

5.6%;泥质砂岩 $n-C_{11-21}$ 、 $n-C_{22-30}$ 和 $n-C_{31-39}$ 数值范围分别为48.8%~54.2%、41.3%~46.7%和4.4%~4.7%,平均值分别为51.2%、44.2%和4.6%。与页岩和泥岩两类岩性相比,泥质砂岩的 $n-C_{31-39}$ 含量最低, $n-C_{11-21}$ 含量最高(表3,图5a)。

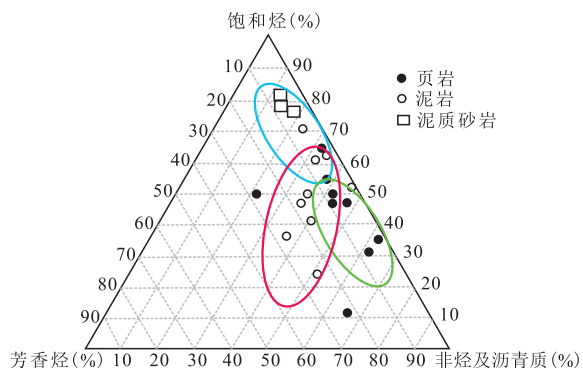


图4 D199井烃类组分的分布特征  
Fig. 4 Distribution characteristics of hydrocarbon components of Well-D199

不同岩性之间,规则甾烷相对含量也不同。色谱质谱实验分析结果表明,烃源岩的 $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 和 $C_{29}$ 规则甾烷相对含量(即 $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$ 规则甾烷分别占规则甾烷的比例)分别在19.8%~25.6%、27.2%~39.8%和40.0%~51.8%,平均值分别为22.3%、33.5%和44.1%(表3)。图5b显示烃源岩母质来源为混合源,表3显示泥质砂岩、泥岩和页岩的 $C_{27}$ 规则甾烷相对含量较 $C_{29}$ 低,说明高等陆地植物的贡献较大。此外,页岩样品的数值变化最小,在三角图上的分布最为集中。

## 5 页岩油运聚规律主控因素探讨

### 5.1 原油性质对页岩油运聚的影响

研究区是一个自生自储的生油气系统,其内部烃无外部贡献,且3类烃源岩皆是具有生烃能力的源岩,因此,为消除储集空间发育对石油组分分布的影

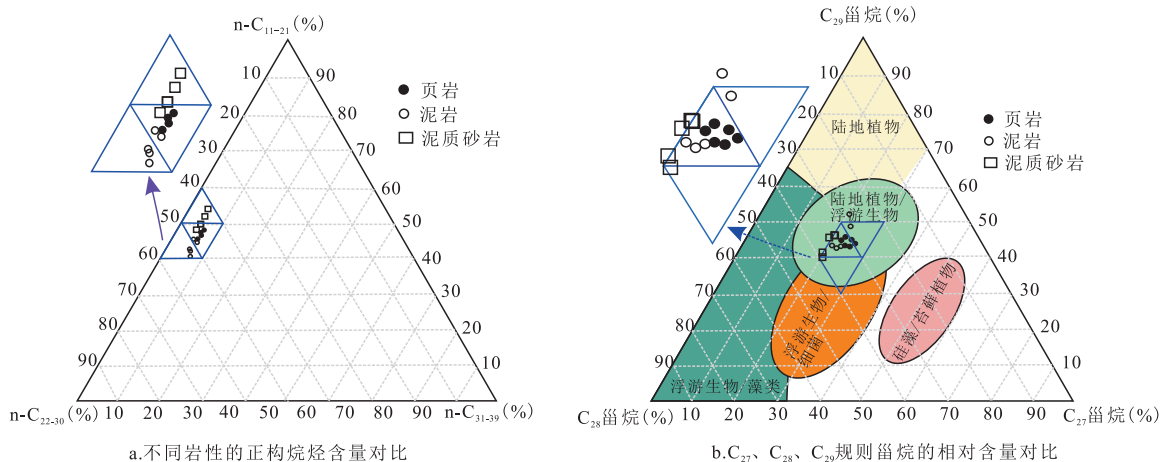


图5 烃源岩生标参数特征

Fig. 5 Biomarker characteristics of source rocks

表3 D199井不同岩性的生物标志物特征对比

Table 3 Comparison of biomarker characteristics of different lithology of Well-D199

岩性		$n-C_{11-21}$	$n-C_{22-30}$	$n-C_{31-39}$	$C_{27}$ 规则甾烷	$C_{28}$ 规则甾烷	$C_{29}$ 规则甾烷
页岩	范围	46.3~50.8	44.2~48.1	4.6~5.9	22.4~25.6	30.4~34.2	43.3~44.7
	平均值	48.7	45.9	5.3	23.8	32.5	43.8
泥岩	范围	41.4~46.5	48.9~52.1	4.6~6.5	21.1~23.9	27.2~35.8	43.0~51.8
	平均值	44.0	50.4	5.6	22.2	32.2	45.8
泥质砂岩	范围	48.8~54.2	41.3~46.7	4.4~4.7	19.8~21.2	35.2~39.8	40.0~45.0
	平均值	51.2	44.2	4.6	20.3	37	42.3
总计	范围	41.4~54.2	41.3~48.1	4.4~5.9	19.8~25.6	27.2~39.8	40.0~51.8
	平均值	47.8	46.9	5.2	22.3	33.5	44.1

响,本次研究引用一个新的组合指标,即 $S_1/(S_1+S_2)$ 来表征页岩油的相对含量。从页岩油相对含量与烃类组分的表征结果来看,随着页岩油相对含量的增加,页岩油中的饱和烃含量逐渐升高,非烃与沥青质的含量逐渐降低,而芳香烃的变化趋势不明显(图6)。由于页岩油相对含量能大致代表烃源岩内液态烃的排运效率,上述现象表明排运效率越高的烃类,其饱和烃组分的含量越高,非烃与沥青质组分的含量越低。这是因为沥青质主要是一些大分子物质,非烃则主要是具有极性的N、S、O组分,容易吸附于干酪根表面而运移相对困难,而具有小分子的饱和烃组分则运移相对容易,所以说饱和烃组分最容易发生排运过程,非烃与沥青质组分最不容易发生排运过程,这说明烃类组分在排运聚过程中具有分异现象。

另外,通过对饱和烃地化特征研究分析发现,泥质砂岩(多数是外来烃)具有多碳正构烷烃含量较低,而低碳正构烷烃含量高的特征(表3),这在很大程度上也表明大分子正构烷烃的运移相对较为困难,而小分子正构烷烃的运移相对较为容易。

此外,从不同的岩性上看,泥质砂岩的页岩油相对含量最高,其饱和烃组分含量也最高,非烃与沥青质组分的含量则最低。这是由于泥质砂岩更利于烃类的排运,泥质砂岩的烃类组分特征进一步证实了不同组分的排运难易程度具有差异。

## 5.2 厚度和物性对页岩油运聚的影响

图7为D199井在1362~1374 m深度范围内地化参数特征与岩石组合的关系。该段的岩性主要为砂岩、泥岩、页岩、泥质砂岩。通过对该深度段内的地化参数分析发现,在薄层砂岩、泥质砂岩岩性中,其热解烃含量极低但却具有不同含量的页岩油(游离烃),可以推断该类储层中的页岩油是由邻近页岩或泥岩生成并运移而来。

在D199井1367.9~1374 m深度范围内(图7),其岩性为深灰色泥岩与黑色页岩发育层段。该层段可近似作为一套较厚的烃源岩层。对比该套烃源岩可以发现,该套烃源岩上部和下部的页岩油绝对含量和相对含量均偏低,而越靠近该层的中部,页岩油绝对含量和相对含量相对偏高。这是由于地质历史

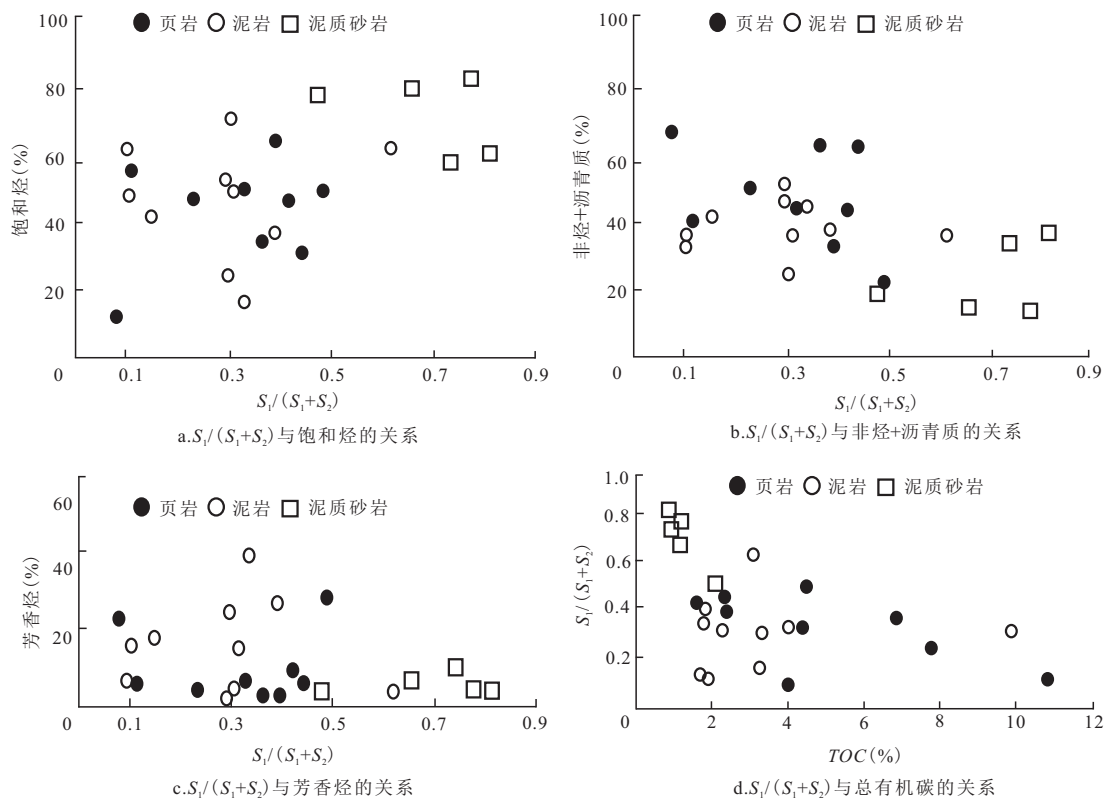


图6 游离烃相对含量与烃类组分的关系

Fig. 6 Relation between relative content of free hydrocarbons and hydrocarbon components

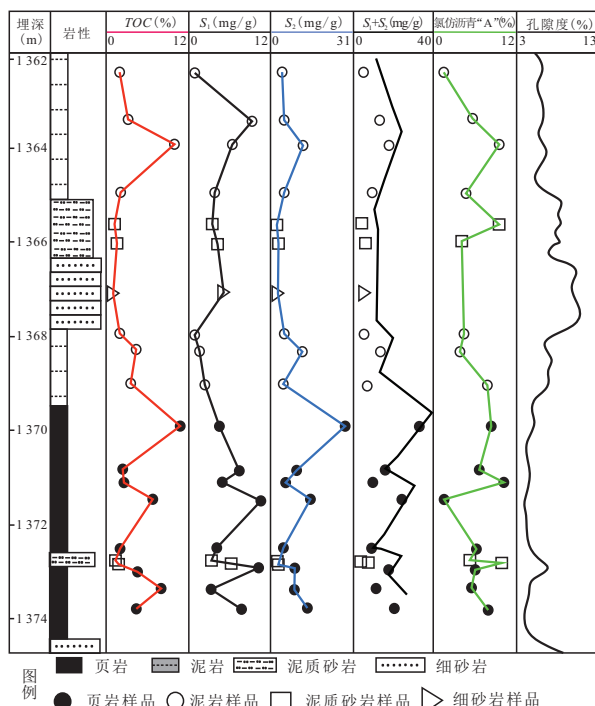


图7 D199井基本地化特征与岩石组合的关系  
Fig. 7 Relation between basic geochemical characteristics and rock combination of Well-D199

时期生成的烃类会在生烃增压作用下发生运移,而不会滞留于原地,因此,可以推断,厚层烃源岩边缘的页岩油在压力的作用下更容易发生运移。厚层烃源岩内部具有较高的页岩油含量,可能是因为烃源岩孔渗性差,在压力的作用下只有部分油气发生了排运作用,部分页岩油未能克服运移阻力而滞留于烃源岩内部,由此使得烃源岩越厚,其内部的油气就越难运移。

在地层剖面组合上,泥质砂岩由于具有较好的孔渗条件,邻近页岩或泥岩生成的油气容易通过排烃作用进入其中。页岩或泥岩由于孔渗条件相对较差,沥青质及N、S、O等极性大分子组分难以通过排烃作用进入邻近砂岩或者泥质砂岩,导致了泥质砂岩中具有较高的页岩油气含量(游离烃含量)。因此,可以判断岩石物性对页岩油的分布起到了控制作用。

## 6 结论

1) 研究区烃源岩类型以Ⅱ<sub>1</sub>型和Ⅱ<sub>2</sub>型为主,其中页岩以Ⅱ<sub>1</sub>型为主;泥岩以Ⅱ<sub>1</sub>型和Ⅱ<sub>2</sub>型为主;泥质

砂岩主要为Ⅱ<sub>2</sub>型。

2) 安塞地区长7段烃源岩的排烃受岩性的控制,不同烃源岩的生烃能力差异较大,页岩生烃能力最强,泥岩次之,泥质砂岩最弱。泥质砂岩中S<sub>1</sub>不代表原地的游离烃含量,而是游离烃发生运移后的结果。

3) 不同岩性中页岩油的基本组分(饱和烃、芳香烃和非烃/沥青质组分)分布具有明显的分异现象,生标参数特征在不同岩性中的分布也具有一定的差异。

4) 烃源岩母质来源为混合源,泥岩、页岩和泥质砂岩的C<sub>27</sub>规则甾烷相对含量较C<sub>29</sub>低,说明高等陆地植物的贡献较大。

5) 原油性质、源储厚度和物性对页岩油的运聚皆有较强的影响。小分子烃类组分相对容易运移,饱和烃组分相对于非烃/沥青质容易运移,烃源岩厚度越薄,其内部的油气越容易运移。

### 参考文献

- [1] ZOU C N, YANG Z, CUI J W, et al. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 15-17.
- [2] 刘毅. 渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组页岩油储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
LIU Yi. Study on shale oil reservoir characteristics of Shahejie Formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2018.
- [3] 王强. 鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油和页岩油的地球化学特征及成因[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.  
WANG Qiang. Geochemical characteristics and genesis of tight and shale oil from the 7<sup>th</sup> Member of Yanchang Formation in Ordos Basin[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [4] COBBOLD P R, ZANELLA A, RODRIGUES N, et al. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): Worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 1-20.
- [5] 罗晓容, 张立强, 张立宽, 等. 碎屑岩输导层非均质性与油气运聚成藏[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 253-272.  
LUO Xiaorong, ZHANG Liqiang, ZHANG Likuan, et al. Heterogeneity of clastic carrier bed and hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 253-272.
- [6] 梅啸寒, 张琴, 王雅芸, 等. 松辽盆地扶新隆起带扶杨油层地

- 层水化学特征及其与油气运聚关系[J].石油与天然气地质, 2020,41(2):328-338.
- MEI Xiaohan, ZHANG Qin, WANG Yayun, et al. Hydrochemical characteristics of formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2):328-338.
- [7] 孟伟. 东营凹陷古近系油气运移和聚集的流体和岩石的地球化学响应[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- MENG Wei. Geochemical response of fluids and rocks to hydrocarbon migration and accumulation in paleogene of Dongying depression[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [8] HUNT J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [9] 黄传波,王媛. 油气运聚地化分析技术在塔里木盆地台盆区的应用[J].海相油气地质,2001,6(2):45-50.
- HUANG Chuanbo, WANG Yuan. Application of geochemical analysis technology of hydrocarbon migration and accumulation in platform basin area of Tarim Basin[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2001, 6(2): 45-50.
- [10] 刘庆,张林晔,沈忠民,等. 东营凹陷富有机质烃源岩顺层微裂隙的发育与油气运移[J].地质论评,2004,50(6):593-597.
- LIU Qing, ZHANG Linye, SHEN Zhongmin, et al. Microfracture occurrence and its significance to the hydrocarbons expulsion in source rocks with high organic matter abundance, Dongying Depression[J]. Geological Review, 2004, 50(6): 593-597.
- [11] 王森,宋国奇,王学军,等. 东营凹陷咸化湖相纹层状烃源岩初次生排烃流体特征[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2020,44(2):31-41.
- WANG Miao, SONG Guoqi, WANG Xuejun, et al. Fluid features during the initial stage of hydrocarbon generation and expulsion in oil-water lacustrine laminated source rocks of Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2020, 44(2): 31-41.
- [12] LIU S J, GAO G, GANG W Z, et al. Implications of organic matter source and fluid migration from geochemical characteristics of stylolites and matrix in carbonate rocks: A case study from the Carboniferous and the Ordovician in the Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 186: 106606.
- [13] 徐锐,汤达祯,严启团,等. 天然气中微量元素的分布及地球化学特征研究[J].科技通报,2016,32(3):21-28.
- XU Rui, TANG Dazhen, YAN Qituan, et al. Distribution and geochemical characteristics of trace elements in natural Gas[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(3): 21-28.
- [14] 郭懿莹. 鄂尔多斯盆地安塞油田三叠系延长组长7油层组沉积相及储层特征研究[D].西安:西北大学,2013.
- GUO Yixuan. Study on sedimentary facies and reservoir characteristics of Chang 7 Oil Formation in Ansai Oilfield of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2013.
- [15] 马瑶. 鄂尔多斯盆地志丹地区三叠系延长组长9油层组储层特征研究[D].西安:西北大学,2015.
- MA Yao. Research on characteristics of Chang 9 oil reservoir of the triassic Yanchang Formation in Zhidan Area, Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2015.
- [16] 史桐. 鄂尔多斯盆地安塞油田三叠系延长组低幅度构造研究[D].西安:西北大学,2014.
- Shi Tong. The study of low-amplitude structure of Triassic Yan'chang Formation in Ansai oilfield, Ordos basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2014.
- [17] 魏登峰. 鄂尔多斯盆地P地区延长组长7致密油藏形成机制与富集规律[D].成都:西南石油大学,2015.
- WEI Dengfeng. Formation mechanism and accumulation pattern of tight oil chang 7 oil reservoir in the Yanchang formation para, Ordos basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [18] 耿茜. 安塞油田桥19井区长3油层组沉积相与油气聚集规律研究[D].西安:西安石油大学,2015.
- GENG Qian. Research on sedimentary facies and distribution of oil & gas in 19th well[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2015.
- [19] 王强,彭平安,张文正,等. 鄂尔多斯盆地延长组7段页岩全组分定量生烃模拟及原油可动性评价[J].石油学报,2018,39(5):541-553.
- WANG Qiang, PENG Pingan, ZHANG Wenzheng, et al. Quantitative full-component hydrocarbon-generating simulation and crude oil mobility evaluation of shale in 7<sup>th</sup> member of Yanchang formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 541-553.
- [20] 吴志宇,李克永. 安塞油田晚三叠世长7油层组沉积微相及储层非均质性研究[J].西安科技大学学报,2012,32(4):470-475.
- WU Zhiyu, LI Keyong. Sedimentary microfacies and heterogeneity of Chang7 formation in Late Triassic of Ansai Oilfield[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(4): 470-475.
- [21] 王葡萄. 鄂尔多斯盆地延长油田长7段烃源岩综合评价[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
- WANG Putao. Comprehensive evaluation of chang-7 source rocks in Yanchang oil field, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [22] ZHANG L K, LUO X R, VASSEUR G, et al. Evaluation of geological factors in characterizing fault connectivity during hydrocarbon migration: Application to the Bohai Bay Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1634-1647.

(编辑 李青)