

重排藿烷参数示踪陇东地区油藏充注途径

李威^{1,2}, 文志刚¹, 徐耀辉¹, 朱翠山¹, 高永亮¹

(1. 长江大学 资源与环境学院, 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;

2. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组原油为弱氧化-还原、淡水-微咸水环境下低等藻类与高等植物混源生成, 均为成熟-高成熟阶段, 属于同一族群原油, 且在平面上普遍分布。大部分学者都集中研究原油垂向运移成藏机理, 但是对于平面上的充注运移机理则一直少有关关注和研究。基于重排藿烷/藿烷($C_{30}^*/C_{30}H$)比值的热稳定性, 分析 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数在表征石油充注运移方面的可行性, 认为对于成熟-高成熟原油, $C_{30}^*/C_{30}H$ 值可能不仅仅是热成熟度的良好响应, 对比 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数与MDR参数(4-1-甲基二苯并噻吩比值)、暴露/屏蔽烷基二苯并噻吩参数, 发现 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数与两参数都具有极好的正相关性, 表明 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数不仅是良好的热成熟度参数还是良好的石油充注运移参数。利用 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数示踪陇东地区长7油层组的石油充注方向, 发现华池地区为主要充注点, 向西南、北东方向呈波阵面的方式充注运移, 具有连续充注的特征。研究结果初步表明, $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数是示踪石油充注途径的有效参数。

关键词:重排藿烷/藿烷比值; 充注途径; 长7油层组; 陇东地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Hydrocarbon charging pathway tracing with rearranged hopane parameters in Longdong area, Ordos Basin

Li Wei^{1,2}, Wen Zhigang¹, Xu Yaohui¹, Zhu Cuishan¹, Gao Yongliang¹

(1. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Oil samples from the seventh member of the Yanchang Formation in Longdong area of Ordos Basin were found to be mature-highly mature crudes of a same family that were generated by mixed lower algae and higher plants under a weak oxidation-reduction and fresh-brackish water setting and were extensive in plane distribution. Most previous studies were focused on the vertical migration and accumulation of the crude, and the horizontal migration and charging of the oil was largely neglected. Based on the thermostability analyses of rearranged hopane (diahopane)/hopane ($C_{30}^*/C_{30}H$) ratios, we studied the possibility of using $C_{30}^*/C_{30}H$ ratio to trace crude migration and charging and came with supportive results. The ratios of mature-highly mature crude were observed to be a biomarker not only for thermal maturity but also for crude migration and charging, as it shows a positive correlation with two other parameters: MDR and exposure/shielding alkyl dibenzothiophenes. By applying the ratio to trace the crude charging direction in the seventh member of the Formation, we found that the crude was migrating and charging continuously southwest- and northeast-ward in the modes of wavefront to Huachi area. The result verified the idea of using the ratio as an effective parameter for tracing oil charging pathways.

Key words: rearranged hopane/hopane ratio, charging pathway, seventh member of the Yanchang Formation, Longdong area, Ordos Basin

收稿日期: 2016-06-29; 修订日期: 2017-06-14。

第一作者简介: 李威(1988—), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探。E-mail: liwei123456@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 文志刚(1965—), 男, 博士、博士生导师, 有机地球化学及石油地质学。E-mail: wzg728@sina.com。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技创新项目(2008D-5006-01-10); 中国地质调查局“中国中东部构造体系控油作用研究”项目(1212011120965)。

重排藿烷类化合物在地质体中广泛分布于烃源岩与原油中,是饱和烃生物标志化合物的重要组成部分。重排藿烷类是指与正常藿烷有相同的碳环骨架,而甲基侧链碳位有所不同的一类生物标志物,在烃源岩和原油中存在多种同系物。目前被检测和确认的有4种类型,分别为 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷、 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷、 21 -甲基- 28 -降藿烷和早洗脱重排藿烷,其中 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷系列与 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷系列在地质体中分布广泛^[1-4]。

从重排藿烷类化合物被鉴定之后,具有异常丰度的烃源岩与原油就成为有机地球化学研究的焦点。对于重排藿烷(C_{30}^*)的母质来源,部分学者认为来源于特殊宏观藻类^[5-6],但宏观藻类是唯一的贡源生物还只是特例,以及 C_{30}^* 与母质之间的成因关系,则尚不清楚^[7]。目前,更多的国内外学者主要集中于探讨沉积古环境、古水介质酸碱性和氧化性及成岩作用等方面对重排藿烷的影响,多数学者认为弱氧化-弱还原、偏酸性介质同时富含粘土的环境有利于重排藿烷(C_{30}^*)的形成,部分学者发现适度的碱化条件下富含粘土的催化作用有利于 C_{30}^* 的形成^[8-10],即对于重排藿烷的影响因素普遍认同弱氧化-弱还原环境下粘土具有催化作用,但是古水介质环境条件的认识则尚未统一。对于 C_{30}^* 在成熟度方面的应用,普遍认同新藿烷及重排藿烷类参数可以作为有效的成熟度指标,且其在成熟-高熟阶段更有效^[11-13]。但 C_{30}^* 在运移方面的作用及效果,国内外文献中少有报道;Peters等^[14]根据 C_{30}^* 在源岩与原油中的差异性而推测其可能与运移有关,但并没有就运移作用及效果展开研究和报道。

在近几年对鄂尔多斯盆地地质、地化研究的基础上,选择延长组致密油发育段,探索运用重排藿烷参数示踪原油的充注运移途径,以期展示重排藿烷在运移研究方面的应用前景。

1 样品与地质背景

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部,构造平缓,以岩性圈闭油藏为主,其中致密油主要发育于延长组长6—长8段。本次研究不仅收集和调研前人所做的部分资料,同时大量采集烃源岩和原油样品,其中有针对性地采集了延长组长3—长9油层组的14块泥岩样品,采集的40个原油样品主要来自长7油层组。在对源岩进行热解分析的同时,对原油、烃源岩进行族组分分离、饱和烃气相色谱-质谱定量分析及芳烃气相色谱-质谱分析等多项分析测试。分析测试由长江大学

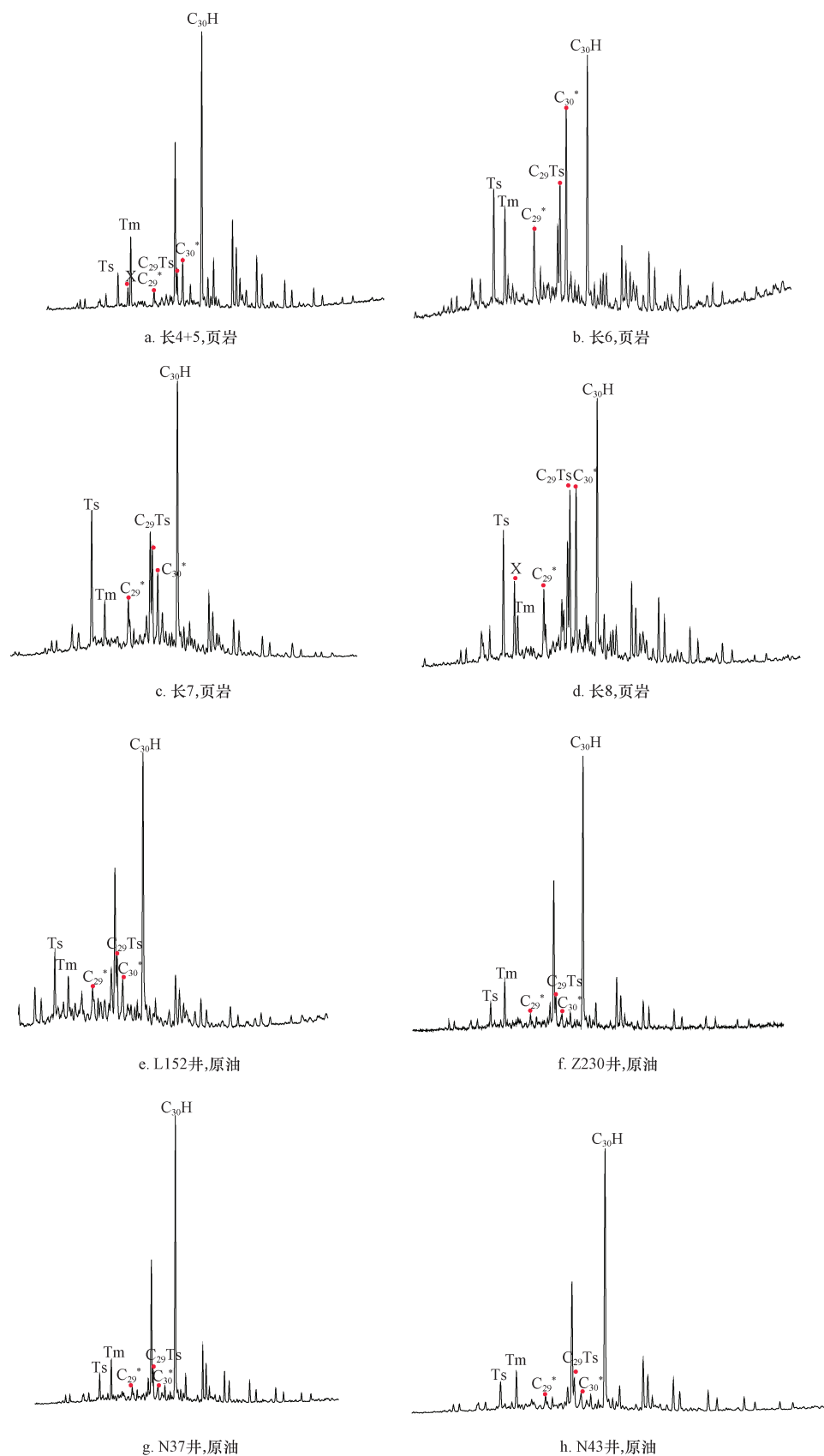
油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成。

2 成果与讨论

2.1 源岩 C_{30}^* 丰度影响因素

本次分析的泥岩样品在延长组长3—长9油层组均有分布,在 m/z 191色-质谱图中泥岩普遍发育 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷系列(C_{29}Ts , Ts)和 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷系列(C_{30}^* , C_{29}^*),同时部分层位泥岩发育早洗脱重排藿烷(图1)。纵向上,长3—长9油层组 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷系列(C_{29}Ts , Ts)和 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷系列(C_{30}^* , C_{29}^*)含量变化是一致的,相关性极好,说明两种重排藿烷类型具有类似的地球化学属性,影响因素相似(图2a)。前人研究认为,新藿烷相对丰度主要受沉积-有机相条件的控制^[11],推断源岩的重排藿烷系列也主要受这方面的影响。由图2a可以看出,相对于有机质丰度(TOC),硫(S)的丰度在纵向上的变化趋势与两个重排藿烷系列相似度更高,正相关性更明显;有机质丰度对 C_{30}^* 丰度的影响并不显著,而烃源岩中的 S 含量对 C_{30}^* 丰度有一定的影响。从其族组分变化来看,饱和烃相对含量与重排藿烷系列丰度的变化趋势不明显,但也可看出当饱和烃含量高于50%时,重排藿烷系列丰度相对较高;非烃、沥青质与重排藿烷系列丰度无正相关性,纵向上略有负相关性;而芳烃的相对含量在纵向上的变化趋势与重排藿烷系列丰度相似,正相关性较明显。对于上述各参数代表的意义,认为有机质丰度(TOC)是对有机质富集程度的直观反应; S 含量更多来自无机及有机杂环化合物,常常作为一种沉积响应特征;族组分是对有机质及沉积古环境下形成烃类的宏观反应。根据3方面与重排藿烷丰度的相关性,认为沉积-有机相对原始重排藿烷丰度可能具有更重要的影响作用。

进一步分析族组分中的芳烃结构,通过色谱-质谱实验检查出的230余种芳香烃系列化合物,主要为8个系列,包括萘系列、菲系列、蒽系列、二苯并噻吩系列、联苯系列、二苯并呋喃系列、芴系列和三芳甾烷系列化合物。对于芳烃中的含硫类化合物,王铁冠^[15]认为含硫芳烃类化合物主要为烷基二苯并噻吩类(DBTs)杂环化合物。 DBTs 分子参数研究应用较成熟,国内外绝大多数研究者都用来作为成熟度参数,Connan等人^[16]和Radke^[17]定义了“甲基二苯并噻吩(MDBT)比值”($\text{MDR} = 4 - \text{MDBT}/1 - \text{MDBT}$),作为有效的成熟度参数, MDR 参数既适用于石油热演化作用早、中期的低成熟-成熟阶段,又可应用于晚期的高成

图1 陇东地区烃源岩及原油样品 m/z 191 质量色谱Fig.1 m/z 191 mass chromatograms of source rock extracts and crude samples from Longdong areaX. 早洗脱重排藿烷; C_{29}^* . C_{29} 重排藿烷; C_{30}^* . C_{30} 重排藿烷; $C_{30}H$. C_{30} 藿烷; $C_{29}Ts$. C_{29} 降新藿烷; Ts . C_{27} 三降新藿烷; Tm . C_{27} 三降藿烷

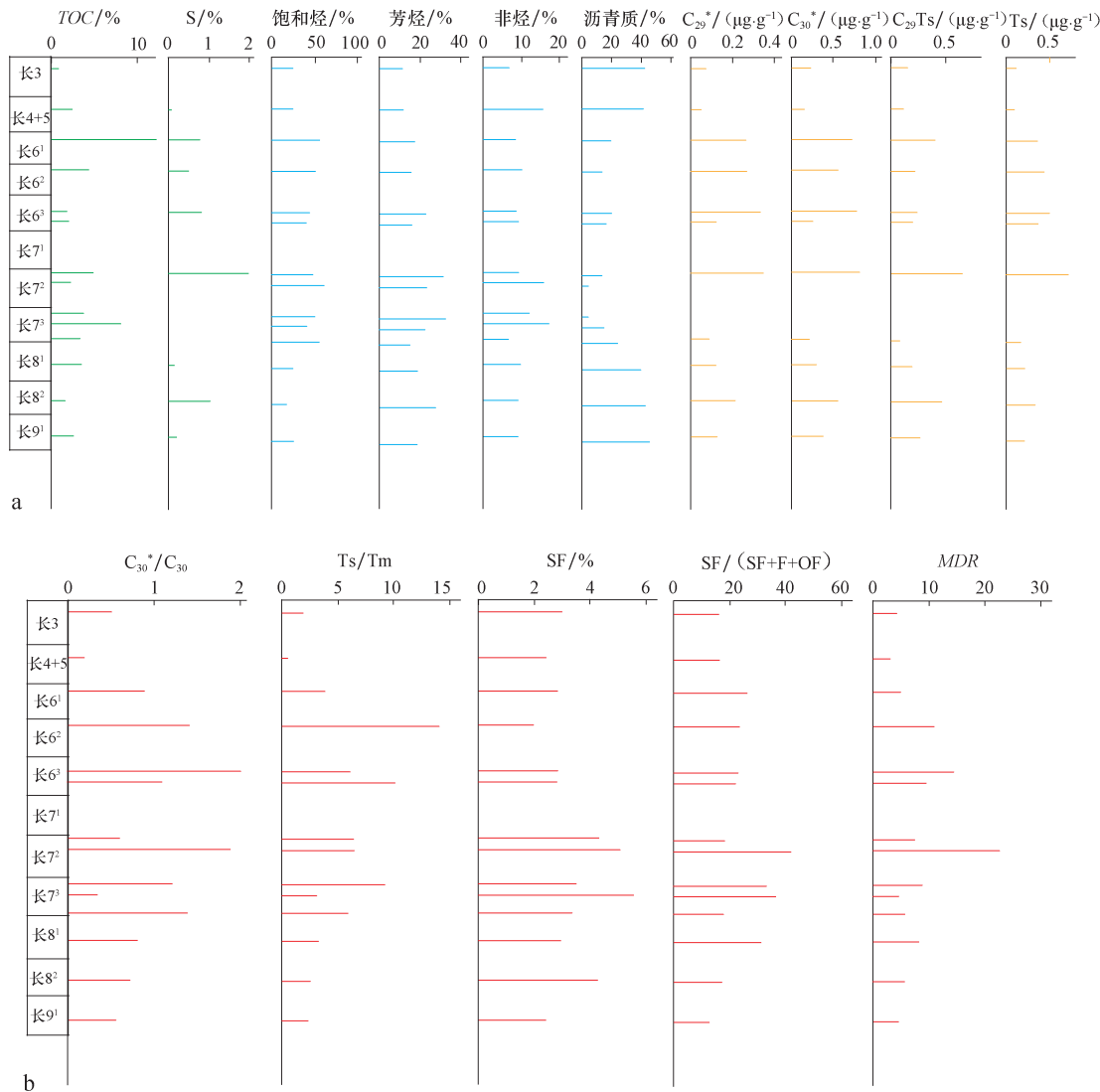


图 2 陇东地区源岩地球化学剖面

Fig. 2 Geochemical profiles of source rocks from Longdong area

C_{29}^* 、 C_{29} 重排藿烷; C_{30}^* 、 C_{30} 重排藿烷; $C_{29}Ts$ 、 C_{29} 降新藿烷; Ts 、 C_{27} 三降新藿烷; Tm 、 C_{27} 三降藿烷; F 、 SF 、二苯并噻吩;
 OF 、二苯并呋喃; MDR 、 $4-MDBT/1-MDBT$ 、甲基二苯并噻吩比值

熟-过成熟阶段。对于 DBTs 的影响因素,前人研究认为有机质类型和沉积环境等因素对 DBTs 类丰度以及其成熟度参数 MDR 等有影响^[15,18]。结合上文分析, C_{30}^* 丰度和 MDR 均受沉积-有机相的影响。同时图 2b 显示,源岩中原始 $C_{30}^*/C_{30}H$ (C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷)参数与成熟度参数 Ts/Tm 变化趋势极为相似,正相关性明显,表明 $C_{30}^*/C_{30}H$ 比值与 MDR 比值类似,在成熟度方面也有显著的应用效果。这一点前人做过诸多研究,一致认为重排藿烷类化合物相对丰度在成熟-高成熟阶段与热成熟作用更为密切^[11],即 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数在影响因素及在成熟度方面的显著效果都与 DBTs 类分子参数 MDR 相似。分析二苯并噻吩系列中化合物丰度及各类参数与重排藿烷的关系(图

2b)可以看出, $C_{30}^*/C_{30}H$ (C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷)参数与 MDR 参数相关性最好。这表明,纵然两种化合物的分子结构不同,当烃源岩处于成熟-高成熟阶段时,两参数在应用方面可能具有相同的属性和意义。

2.2 $C_{30}^*/C_{30}H$ 比值示踪运移的有效性

2.2.1 原油族群划分

本次在陇东地区所取得的长 6-长 7 原油样品物性和族组成特征基本一致,原油具有低-中密度、低粘度及低-中等凝固点的特征。原油密度为 0.85 g/cm^3 左右,粘度一般为 $5\sim10\text{ mPa}\cdot\text{s}$,凝固点大都在 $10\sim25\text{ }^\circ\text{C}$,属于正常原油,油质轻,流动性好。族组分分离与定量分析表明,饱和烃相对百分含量最高,分布范围

在52%~74%;其次为芳香烃,相对百分含量主要为10%~15%;非烃和沥青质相对百分含量较低。原油正构烷烃分布特征基本一致,均为单峰型,呈左偏正态型或者右倾单斜型的形态,碳数范围为 C_{10} — C_{35} ,主峰碳多为 C_{15} — C_{20} , $\sum nC_{21}^-/\sum nC_{22}^+$ 比值为1.0~2.3,说明原油中低分子量烃类相对含量较高,反映了原油母质以低等水生生物来源为主的混源特征。 C_{27} 规则甾烷的优势表征藻类等低等水生生物为主要母质来源,富集 C_{29} 规则甾烷则表明高等植物的贡献更大。本次原油样品质量色谱图上 $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ — $\alpha\alpha\alpha C_{28}$ — $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷均呈“V”字形分布,反映了陇东地区延长组油源岩的有机质母质来源具有低等水生生物与陆源高等植物的双重贡献。在 $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ — $\alpha\alpha\alpha C_{28}$ — $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷三角图中,原油集中分布在 II_1 — II_2 区域,同样反映了原油母质具有低等水生生物与陆源高等植物的双重贡献,母质特征相似(图3)。Pr/Ph比值是一项常用于确定沉积环境氧化—还原性的有效地球化学指标,低Pr/Ph(姥鲛烷/植烷)比值指示有机质形成于还原环境,高Pr/Ph比值指示氧化环境。本次样品中Pr/Ph比值主要分布在0.70~1.21,大部分分布在1.00左右,指示成烃母质形成于弱氧化—还原环境中。在Pr/ nC_{17} 与Ph/ nC_{18} 相关图中,原油集中分布在混源区,位于弱还原—弱氧化环境区域。伽马蜡烷是一种非藿烷结构的五环三萜烷,其含量高低可以反映母源岩沉积时的水体盐度和水体分层程度,含量高说明水体偏咸或水体分层明显。在伽马蜡烷指数与升藿烷指数相关图中,原油集中分布在伽马蜡烷指数、升藿烷指数小于0.1的区域,反映了延长组油源岩淡水—微咸水的沉积环境(图3)。综合以上说明,本次原油样品母质类型相似,沉积环境一致,氧化—还原条件相同,沉积—有机相条件相同。利用饱和烃分子参数和芳烃分子参数分别计算成熟度并作出其分布图(图4)。其中,饱和烃分子参数主要为 C_{29} 甾烷异构体 $20S/(20S+20R)-\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷和 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)-C_{29}$ 甾烷;芳烃分子参数主要利用甲基菲指数 MPI_1 [$MPI_1 = 1.5(2 - \text{甲基菲} + 3 - \text{甲基菲})/(\text{菲} + 1 - \text{甲基菲} + 9 - \text{甲基菲})$];成熟度计算公式为: $R_c = 0.6MPI_1 + 0.4$, $R'_c = 0.55MPI_1 + 0.44$ [17]。图4表明,原油样品分布集中,均处于成熟—高成熟阶段。综合分析认为,陇东地区原油均为弱氧化—还原及淡水—微咸水环境混源贡献生成,且均为成熟—高成熟阶段,为同一族群原油。

2.2.2 原油 $C_{30}^*/C_{30}H$ 比值示踪有效性

油藏充注机理是建立在England^[19]提出的油藏充

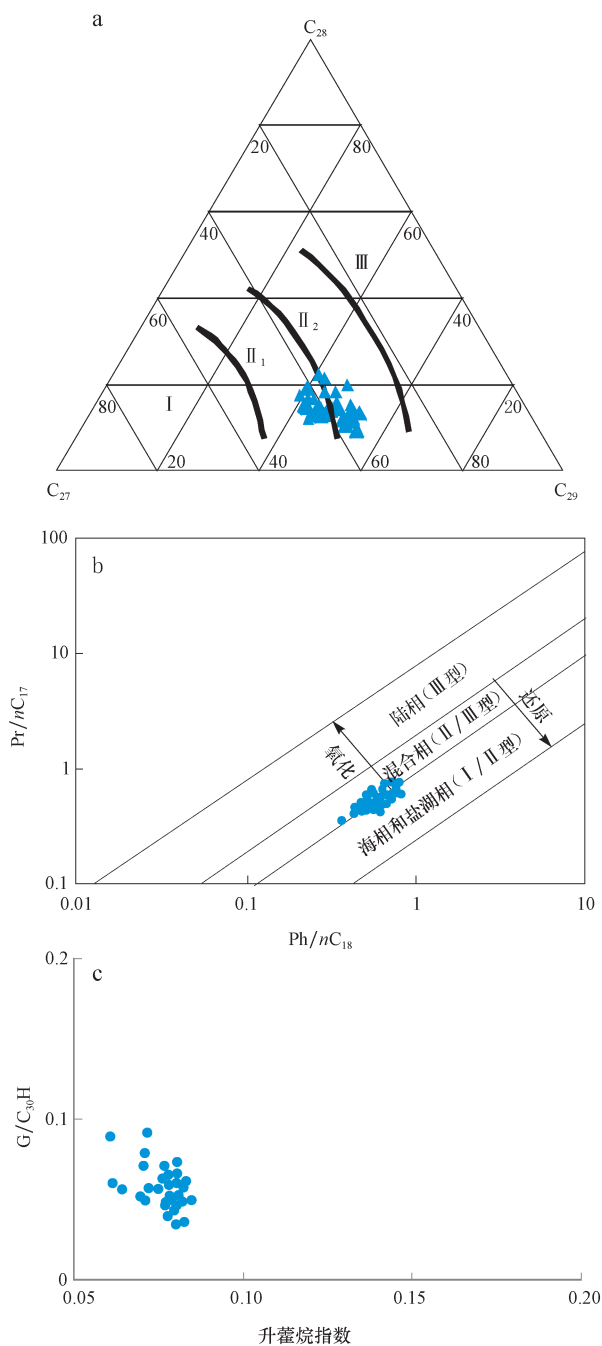


图3 陇东地区原油地球化学成因判别

Fig. 3 Geochemical genesis discrimination diagrams of crude samples from Longdong area

a. C_{27} — C_{28} — C_{29} 规则甾烷分布三角图;b. Pr/ nC_{17} —Ph/ nC_{18} 沉积环境判别图;c. G/ $C_{30}H$ (伽马蜡烷/藿烷)—升藿烷指数相关图

注模式的基础上的,依据油藏内部原油成熟度的微细变化,可以表征石油运移与油藏充注的途径:在一个油藏/油田或者一个含油气区带范围内,源自同一烃源灶的原油,先期充注的石油成熟度较后期充注的石油成熟度相对偏低,成熟度相对最高的石油分布在最接近油藏充注点的地带。前人^[20-26]研究认为,二苯并噻吩分子系由两个苯环间夹一个五元的噻吩环所组成,对

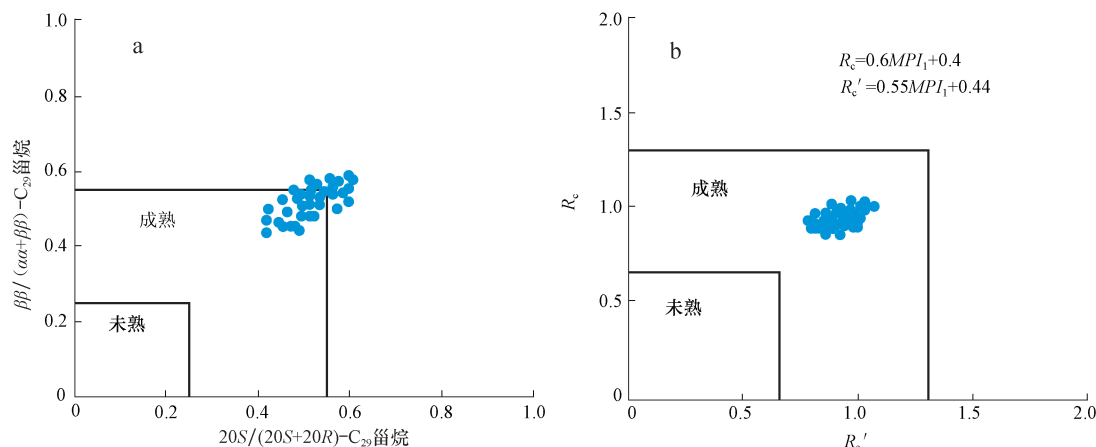


图4 陇东地区原油成熟度分布

Fig. 4 Maturity distribution of crude samples from Longdong area

a. C_{29} 甾烷异构体参数相关图; b. 甲基菲参数 (MPI_1) 成熟度相关图

称性的分子结构使其分子的环系具有很高的热稳定性与抗生物降解性,同时具有示踪原油充注运移的属性。 MDR 为甲基二苯并噻吩比值 ($4-MDBT/1-MDBT$), 利用 MDR 在碎屑岩油藏和碳酸盐岩油藏中示踪运移充注机理均得到良好的应用效果。王铁冠等^[15] 依据热稳定性及分子氢键机理解释了 MDR 参数作为运移示踪参数的原理: 热稳定性方面, $4-MDBT$ 稳定性大于 $1-MDBT$; 氢键形成难易度上, $4-MDBT$ 属于暴露型分子, 氢键易于形成, $1-MDBT$ 属于屏蔽型分子, 氢键相对不易形成。因此, 作为两分子参数的比值, 随着运移距离的增长 MDR 值下降, 这也说明了 MDR 是一个良好的示踪运移的指标。

研究区长7油层组原油样品普遍发育 $18\alpha(H)$ -新藿烷系列和 $17\alpha(H)$ -重排藿烷系列(图1)。结合前人研究及分子结构分析认为, 重排藿烷 C_{30}^* 在色谱-质谱上分子离子峰 (m/z 412) 较强, 而基峰 (m/z 191) 相对弱些, 观察其分子结构认为 C_8-C_{14} 键的空间排列不甚紧密, C 环具有较弱的剪切力, 分子离子有较高的稳定性^[12] (图5)。通过计算 C_{30}^* 和 $C_{30}H$ 的生成

热, C_{30}^* 为 76.1 kJ/mol , $C_{30}H$ 为 82.2 kJ/mol ^[13], 即热稳定性上 C_{30}^* 大于 $C_{30}H$ 。如此表明, 在热稳定性方面, MDR 和 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数具有一致性, 在油藏中宏观体现为最接近烃源岩的位置 MDR 和 $C_{30}^*/C_{30}H$ 值相对最高。

利用参数 MDR 和 $C_{30}^*/C_{30}H$ 作出其相关图(图6a), 两者之间呈现极好的正相关性, $R^2 = 0.904$ 。结合前文分析, 原油样品均处于成熟-高成熟阶段, 且为同一族群, $C_{30}^*/C_{30}H$ 与 MDR 两种参数在应用方面应该具有相同的属性和意义, MDR 作为一个良好的运移示踪指标, $C_{30}^*/C_{30}H$ 应该也具有相似性。同时, 基于二苯并噻吩分子结构的特殊性, 划分出暴露型异构体与屏蔽型异构体。单纯从氢键形成机理上可知, 暴露型异构体/屏蔽型异构体比值(简称为 $DMDBT'$) 随着充注运移的增加, 其比值是减小的。图6b为 $DMDBT'$ 与 $C_{30}^*/C_{30}H$ 相关图, 两者之间的 $R^2 = 0.883$, 也表现出了极好的正相关性, 进一步说明 $C_{30}^*/C_{30}H$ 在示踪热成熟方面和运移方面均与 MDR 参数具有较好的一致性, 也可以作为良好的运移示踪参数。

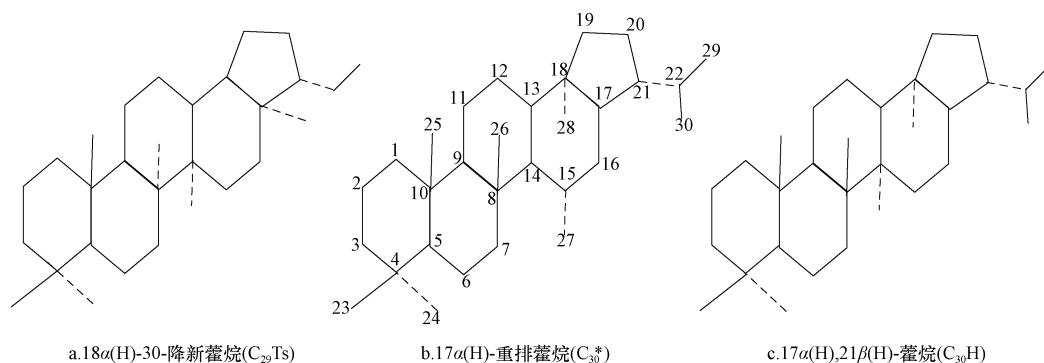


图5 藿烷系列结构

Fig. 5 Structures of hopane compounds

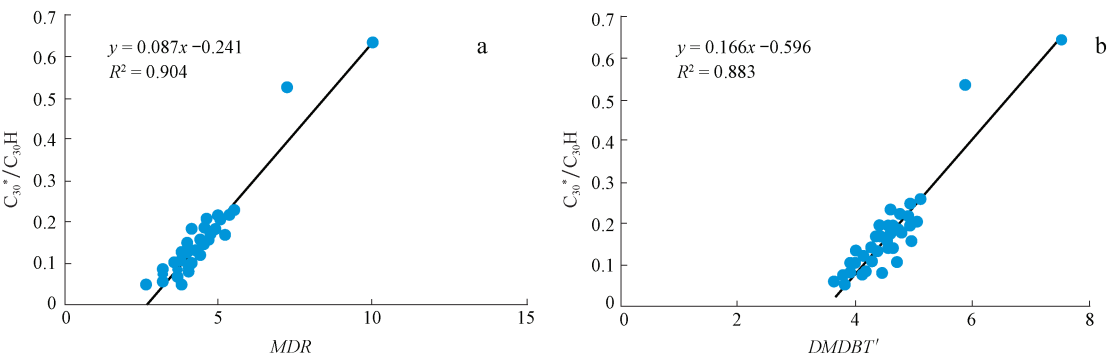


图 6 陇东地区 $C_{30}^*/C_{30}H$ 与 DBTs 类分子参数相关图

Fig. 6 Correlation diagrams of $C_{30}^*/C_{30}H$ and DBTs molecular parameters of samples from Longdong area

a. $C_{30}^*/C_{30}H$ 与 MDR 相关图; b. $C_{30}^*/C_{30}H$ 与 $DMBT''$ 相关图

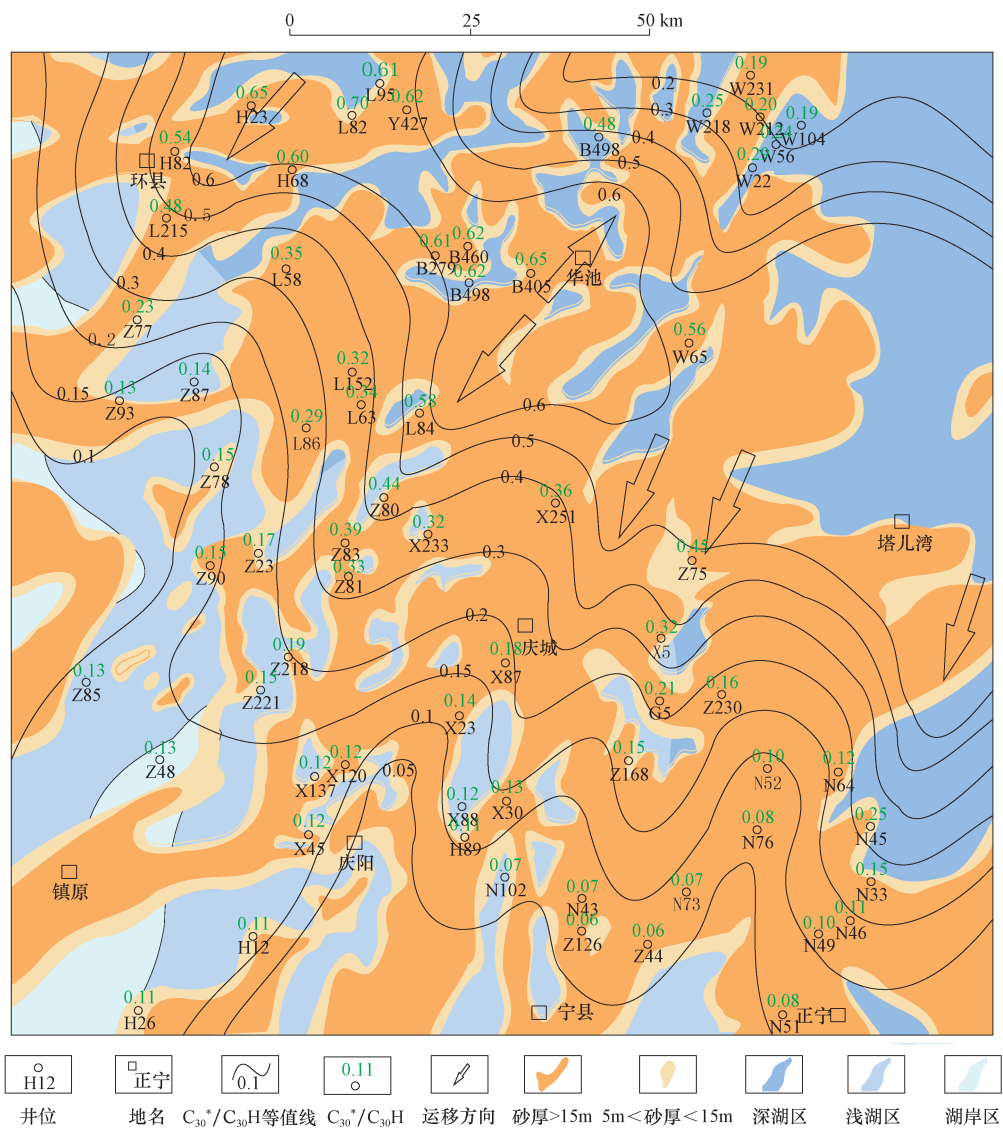


图 7 陇东地区长 7 砂体与运移方向匹配图

Fig. 7 Matching relationship between sandbodies in the seventh member of the Yanchang Formation and crude oil migration direction

2.3 $C_{30}^*/C_{30}H$ 比值示踪运移的效果

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部,发育华池油

田、西峰油田和马岭油田等,现今主要产油层及研究热点层位为延长组长 6—长 8 油层组致密油藏,产油区基本都位于致密储层中的相对优质段^[27-28]。以长 7

油层组为例,研究区普遍发育连片状砂体:物源区位于西南部及南部,由西南往东北向,镇北一带主要为浅湖相、湖滨相,发育三角洲、河道等亚相;马岭—庆阳一带主要为半深湖—深湖斜坡带,发育浊积岩;华池一带为深湖相,主要发育砂质碎屑流;各沉积相带砂体连接成片。长7底部发育一套优质烃源岩,有机质丰度高、类型好,处于生油窗内,为三叠系最重要的一套生油岩,全盆地中生界大部分的原油均来源于该套烃源岩^[29-30]。由前文分析可知,长7油层组原油母质类型相似、沉积古环境相同,均为成熟—高成熟原油,为同一组群,说明原油来源于同一套烃源岩, $C_{30}^*/C_{30}H$ 可以表征原油的充注运移作用。

本文在40口井原油分析的基础上,结合收集28口井原油资料分析整理 $C_{30}^*/C_{30}H$ 参数值,并在平面上作出其分布图。图7为 $C_{30}^*/C_{30}H$ 等值线图及反映的石油运移方向和油藏充注途径。总的来看, $C_{30}^*/C_{30}H$ 丰度以华池为中心向西南、北东方向降低,华池区为充注点。参考鄂尔多斯盆地优质烃源岩平面展布图可以发现,华池位于湖盆沉积中心^[31],是长7优质烃源岩在纵向上及平面上丰度最发育区,也即该区长7底部优质烃源岩为主要的烃源灶,油源主要来自于此;长庆油田产油区带中华池油田为陇东区最大的产油区也在侧面印证了该点。沿华池—镇北方向,石油充注是以波阵面的方式向西南呈5个方向运移,表现为连续充注的特征。结合砂体图可以看出,石油基本上是沿着砂体顺物源充注运移,这点也符合石油地质特征及油气充注原理^[19]。

3 结论

1) 源岩 $C_{30}^*/C_{30}H$ 丰度主要受沉积—有机相影响,高有机质丰度不一定会形成高 $C_{30}^*/C_{30}H$ 丰度;源岩中较高的含硫量往往会引起高的 $C_{30}^*/C_{30}H$ 丰度。

2) C_{30}^* 热稳定性高于 $C_{30}H$,对于 R_c 值超过0.8%的成熟、高成熟原油, $C_{30}^*/C_{30}H$ 与MDR参数具有良好的—致性,可以作为一项有效的成熟度和石油运移示踪参数;对于同一组群的原油, $C_{30}^*/C_{30}H$ 值在示踪运移方面具有良好的效果。

致谢:承蒙长江大学包建平教授、何文祥教授、陈奇老师、宋换新老师对论文的悉心指导与诸多有益建议,一并致以诚挚谢忱!

参 考 文 献

- [1] Moldowan J M, Fago F J, Carison R M K, et al. Rearranged hopanes in sediments and petroleum[J]. *Genchimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(11): 3333–3353.
- [2] Telnaes N, Isaksen G H, Farromond P. Unusual triterpane distribution in lacustrine oil[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(6): 785–789.
- [3] Farrimond P, Telnaes N. Three series of rearranged hopanes in Toarcian sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 25(3): 165–177.
- [4] 张敏. 地质体中高丰度重排藿烷类化合物的成因研究现状与展望[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(9): 1–4.
Zhang Min. Research and prospects of genesis of high abundant rearranged hopanes in geological bodies[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(9): 1–4.
- [5] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 8亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩系[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(5): 636–643.
Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, et al. The oil shale formed by the accumulation of the red algae more than 800 million years ago in Xiamaling Formation[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(5): 636–643.
- [6] 曹剑, 边立曾, 胡凯, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩中发现底栖宏红藻类生烃母质[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(4): 474–480.
Cao Jian, Bian Lizeng, Hu Kai, et al. Benthic macro red alga: A new possible bio-presursor of Jurassic mudstone source rocks in the northern Qaidam Basin, northwestern China[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(4): 474–480.
- [7] Smith M, Bend S. Geochemical analysis and familial association of Red River and Winnipeg reservoir oils of the Williston Basin, Canada[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(4): 443–452.
- [8] 张文正, 杨华, 侯林慧, 等. 鄂尔多斯盆地延长组不同烃源岩 $17\alpha(H)$ -重排藿烷的分布及其地质意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(10): 1438–1455.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Hou Linhui, et al. Distribution and geological significance of $17\alpha(H)$ -diahopanes from different hydrocarbon source rocks of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(10): 1438–1445.
- [9] Kolaczowska E, Slougui N E, Watt D S, et al. Thermodynamic stability of various alkylated, and rearranged 17α - and 17β -hopane isomers using molecular mechanics calculations[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(4–6): 1033–1038.
- [10] 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等. 库车凹陷却勒1井原油的重排藿烷系列及油源对比[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 35–37.
Xiao Zhongyao, Huang Guanghui, Lu Yuhong, et al. Rearranged hopanes in oils from the Quele 1 well, Tarim Basin, and the significance for oil correlation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 35–37.
- [11] 王春江, 傅家谟, 盛国英, 等. $18\alpha(H)$ -新藿烷及 $17\alpha(H)$ -重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1366–1372.
Wang Chunjiang, Fu Jiamo, Sheng Guoying, et al. Geochemical properties and application of $18\alpha(H)$ -neohopanes and $17\alpha(H)$ -rearranged hopanes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(13): 1366–1372.
- [12] 黄海平, 卢松年, 袁佩兰. 古代沉积物中新检出的重排藿烷及其在

- 油气勘探上的意义[J]. 天然气地球科学, 1994, 23(5): 23–28.
- Huang Haiping, Lu Songnian, Yuan Peilan. The new discovered dihopanes in the Paleozoic sediments and their significance in petroleum exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(3): 23–28.
- [13] Obermajer M, Osadetz K G, Fowler M G, et al. Delineating compositional variabilities among crude oils from central Montana, USA, using light hydrocarbon and biomarker characteristics [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(12): 1343–1359.
- [14] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall Inc, 1993: 112–116.
- [15] 王铁冠, 何发岐, 李美俊, 等. 烷基二苯并噻吩类: 示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 176–182.
- Wang Tieguan, He Faqi, Li Meijun, et al. Alkyl-dibenzothiophenes: Molecular tracers for filling pathway in oil reservoirs [J]. China Science Bulletin, 2005, 50(2): 176–182.
- [16] Connan J, Bouroulec J, Dessort D, et al. The microbial input in carbonate-anhydrite facies of Sabkha palaeoenvironment from Guatemala: A molecular approach [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1): 29–50.
- [17] Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils[J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5(3): 224–236.
- [18] Hughes W B. Use of thiophenic organosulfur compounds in characterizing crude oils derived from carbonate versus siliclastic sources [C]. AAPG Studies in Geology, 1984, 18: 181–196.
- [19] England W, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(2): 327–347.
- [20] 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 等. 烷基二苯并噻吩总量示踪福山凹陷凝析油藏充注途径[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(增刊1): 122–128.
- Li Meijun, Wang Tieguan, Liu Ju, et al. Total alkyl dibenzothiophenes content tracing the filling pathway of condensate reservoir in the Fushan Depression, South China Sea [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(S1): 122–128.
- [21] 徐耀辉, 王铁冠, 陈能学, 等. 二苯并噻吩参数与油藏动态监测、剩余油分布预测——以南堡凹陷柳北沙³油藏为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2013, 43(7): 1141–1148.
- Xu Yaohui, Wang Tieguan, Chen Nengxue, et al. DBT parameters and dynamic monitoring during reservoir development, and distribution region prediction of remaining oil: A case study on the Sha-3³ oil reservoir in the Liubei region, Nanpu Sag [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2013, 43(7): 1141–1148.
- [22] 张利文, 李美俊, 杨福林, 等. 二苯并噻吩地球化学研究进展及作为油藏充注示踪标志物的化学机理[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 633–639.
- Zhang Liwen, Li Meijun, Yang Fulin. Progress of geochemical research on dibenzofuran and its chemical mechanism as molecular tracer for oil charging pathways [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 633–639.
- [23] 吕修祥, 杨海军, 王祥, 等. 地球化学参数在油气运移研究中的应用——以塔里木盆地塔中地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 838–846.
- Lu Xiuxiang, Yang Haijun, Wang Xiang, et al. Application of geochemical parameters in hydrocarbon migration studies: Taking Tazhong area of the Tarim Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 838–846.
- [24] 崔景伟, 王铁冠, 徐耀辉. 原油中烷基酚类化合物研究述评[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 51–54.
- Cui Jingwei, Wang Tieguan, Xu Yaohui. Research of alkyl-phenols in crude oils [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(5): 51–54.
- [25] Bastow T P, Aarssen B G K, Alexander R, et al. Origins of alkylphenols in crude oils: Hydroxylation of alkylbenzenes [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(7): 991–1001.
- [26] Galimberti R, Ghiselli C, Chiamonte M A. Acidic polar compounds in petroleum: A new analytical methodology and applications as molecular migration indices [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(12): 1375–1386.
- [27] 任晓霞, 李爱芬, 王永政, 等. 致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响——以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 774–779.
- Ren Xiaoxia, Li Aifen, Wang Yongzheng, et al. Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation—Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 774–779.
- [28] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62–71.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 62–71.
- [29] 刘显阳, 惠潇, 李士祥. 鄂尔多斯盆地中生界低渗透岩性油藏形成规律综述[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 964–974.
- Liu Xianyang, Hui Xiao, Li Shixiang. Summary of formation rule for low permeability lithologic reservoir of Mesozoic in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 964–974.
- [30] 杨华, 张文正, 彭平安, 等. 鄂尔多斯盆地中生界湖相油型油的精细划分与油源对比[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(2): 196–205.
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Peng Ping'an, et al. Oil detailed classification and oil-source correlation of Mesozoic lacustrine oil in Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(2): 196–205.
- [31] 李威, 文志刚. 鄂尔多斯盆地马岭地区上三叠统长7油层组油气富集规律[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 101–105.
- Li Wei, Wen Zhigang. Hydrocarbon enrichment of Upper Triassic Chang-7 oil reservoir set in Maling area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(6): 101–105.