

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.322



重排藿烷：示踪油藏充注途径的分子标志物

李 威^{1,2,3}, 窦立荣^{2,3,4*}, 文志刚², 张光亚³, 程顶胜³, 刘爱香³, 客伟利³

1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028
2. 长江大学资源与环境学院油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034

摘 要: 基于 C_{30} 重排藿烷 ($C_{30}DH$) 和 C_{30} 藿烷 ($C_{30}H$) 热稳定性差异, 研究了 $C_{30}DH/C_{30}H$ 作为油气运移方向和充注途径的可行性. 结果发现: $C_{30}DH$ 结构稳定性高于 $C_{30}H$, $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数具有成熟度属性; 同时对比分析 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数与咔唑类参数的相关性, 认为两者之间正相关性明显, 表明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 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. M 油田位于 Fula 凹陷东部, M 油田原油为弱氧化—还原、淡水—微咸水环境下低等藻类与高等植物混源生成, 属于同一族群原油. 利用 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪 Fula 凹陷 M 油田石油充注方向, 油气运移途径主要为自北向南, 同时还发育自西向东的运移途径; 咔唑类参数也验证了 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪油气运移的准确性. 结果表明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数是示踪石油充注途径的有效参数.

关键词: 充注途径; $C_{30}DH/C_{30}H$; 咔唑; M 油田; Fula 凹陷; 石油地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2021)07-2507-08

收稿日期: 2017-08-28

Rearranged Hopane: Molecular Tracers for Filling Pathway in Oil Reservoirs

Li Wei^{1,2,3}, Dou Lirong^{2,3,4*}, Wen Zhigang², Zhang Guangya³, Cheng Dingsheng³, Liu Aixiang³, Ke Weili³

1. CNOOC Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China
2. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Exploration Technology for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, Beijing 100083, China
4. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China

Abstract: Based on the differences in thermal stability of C_{30} diahopane ($C_{30}DH$) and C_{30} hopane ($C_{30}H$), this paper studied the feasibility of $C_{30}DH/C_{30}H$ in tracing oil migration orientation and filling pathways. The result shows that the thermal stability of $C_{30}DH$ is considered to be higher than $C_{30}H$, $C_{30}DH/C_{30}H$ parameters have maturity properties. Meanwhile, contrast $C_{30}DH/C_{30}H$ parameters with carbazoles, found that the $C_{30}DH/C_{30}H$ parameters and carbazoles have great positive correlation. Indicate that the $C_{30}DH/C_{30}H$ parameters not only is a good thermal maturity parameters but also a good in hydrocarbon charging migration. M oilfield is located in the eastern Fula depression. The oils are all normal and the source materials are dual contributions of lower hydrobiont and terrigenous higher plants, the environment is fresh to slight saline water oxidizing to reducing sedimentation, belong to the same group of crude oil. Using $C_{30}DH/C_{30}H$ parameter tracer M oilfield reservoir group of hydrocarbon charging migration direction in Fula depression. The migration path of oil and gas is mainly from north to south, and it also develops from west to east.

基金项目: 国家油气重大专项项目 (No. 2011ZX05029).

作者简介: 李威 (1988—), 男, 工程师, 主要从事油气形成与分布方面的研究工作. E-mail: liwei173@cnooc.com.cn

* **通讯作者:** 窦立荣, E-mail: doulirong@cnpicnt.com

引用格式: 李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2021. 重排藿烷: 示踪油藏充注途径的分子标志物. 地球科学, 46(7):2507-2514.

The classic carbazoles parameter also verified the $C_{30}DH/C_{30}H$ tracer the accuracy of the oil and gas migration. Preliminary results show that $C_{30}DH/C_{30}H$ parameters is an effective parameter for tracer oil filling way.

Key words: hydrocarbon charging migration; $C_{30}DH/C_{30}H$; carbazoles; M oilfield; Fula depression; petroleum geology.

0 引言

England *et al.* (1987)首次建立砂岩油藏充注模式,利用原油的成熟度、气油比以及原油物性等参数的变化规律示踪成藏过程中石油充注运移的方向与优势途径,确定油藏充注点的位置. 主要判断依据是根据油藏内部原油成熟度的微细变化,在一个油藏/油田或者一个含油气区带范围内,若原油源自同一烃源灶,时间上先期充注的石油成熟度较后期充注的石油相对偏低,晚期成熟度较高的原油驱动早期成熟度较低的原油,以“波阵面”方式持续向前运移充注,平面上在最接近油藏充注点的地带成熟度相对最高. 以此理论为依据,众多学者利用咔唑类含氮化合物的地色层分馏效应(Li *et al.*, 1995),诠释了油气运移充注的路径,推动了油气运移充注方向的研究. 近年来有研究人员在对芳烃深入研究的基础上,选用了二苯并噻吩类参数示踪油气运移路径,并从机理及分子结构上阐述了该类参数不仅仅具有地色层分馏效应更具有成熟度意义,两种作用的叠加示踪作用尤为明显,进一步补充完善了England *et al.* (1987)的充注模式,同时提出运用该机理的前提条件是原油样品属于同一族群,多期充注不会影响该类参数对油气示踪方向的判断.

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. 目前被检测和确认的有4种类型,分别为 $18\alpha(H)$ -新藿烷、 $17\alpha(H)$ -重排藿烷、早洗脱重排藿烷、新重排藿烷系列(21-甲基)-(28-降藿烷),其中 $17\alpha(H)$ -重排藿烷系列与 $18\alpha(H)$ -新藿烷系列在地质体中分布广泛(Moldowan *et al.*, 1991; Telnaes *et al.*, 1992; Farrimond and Telnaes, 1996; 张敏, 2013).

国内外大多数学者将重排藿烷类参数主要用作环境及母源参数. 对于重排藿烷($C_{30}DH$)的母质意义,部分学者认为来源于特殊宏观藻类(Zhang *et al.*, 2007),但 $C_{30}DH$ 与母质之间的成因关系及形成机理则尚未清楚(Smith and Bend, 2004). 目前更多的国内外学者普遍认同 $C_{30}DH$ 参数与富黏土环境有关,而对于水体环境却有不同的争议,多数学者认为弱氧化-弱还原、偏酸性介质同时富含黏土的

环境有利于重排藿烷($C_{30}DH$)的形成,部分学者发现适度的碱化条件下富含黏土的催化作用有利于 $C_{30}DH$ 的形成(Kolaczowska *et al.*, 1990; 肖中尧等, 2004; Zhang *et al.*, 2009). 但 $C_{30}DH$ 在油气运移充注方面的作用及效果,国内外文献中,少有报道, Peters *et al.* (2005)根据 $C_{30}DH$ 在源岩与原油中的差异而推测可能与油气充注运移有关. 黄海平等(1994)从分子机理上分析认为 $C_{30}DH$ 参数稳定性更优越,重排藿烷类参数受成熟度影响可以作为有效的成熟度指标(Li *et al.*, 2009);结合砂岩油藏充注模式, $C_{30}DH$ 参数的热稳定性优势从理论上是可以用作表征油气充注方向的.

通过近几年对海外探区 Muglad 盆地 Fula 凹陷地质、地化研究的基础上,选择 M 油田为例,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充注运移方面的应用前景.

1 样品与地质背景

Fula 拗陷位于 Muglad 盆地东北部,总体呈近南北向长条状展布,两侧为控凹断层. M 油田位于 Fula 拗陷东部中央隆起带,整体上表现为受基底隆起所影响的断背斜构造(图 1). 前人研究认为该油田油气来源于主力烃源岩层段 Abu Gabra 组中部巨厚湖相暗色富含有机质的泥岩,储层主要为 Abu Gabra 湖相砂岩、Bentiu 组河流相块状砂岩及 Aradeiba 组三角洲砂岩,盖层主要为 Abu Gabra 组湖相暗色泥岩和 Aradeiba 组泛滥平原相、浅湖相泥岩(Dou *et al.*, 2013),在纵向上构成了自生自储、下生上储等多套成藏组合. 本次研究选取 M 油田 10 口井原油资料(图 1). 对原油进行族组分分离、饱和烃 GC-MS 分析、饱和烃 MS-MS 分析、芳烃 GC-MS 分析等多项分析化验测试. 分析测试化验在中国石油大学实验室完成.

2 原油族群划分

Fula 凹陷 M 油田原油样品层位主要为 Abu Gabra 组顶部及 Bentiu 组,原油 API 分布在 $16^{\circ}\sim 39^{\circ}$,平均为 30° 左右,具有低-中密度原油. 原油链烷烃分布较完

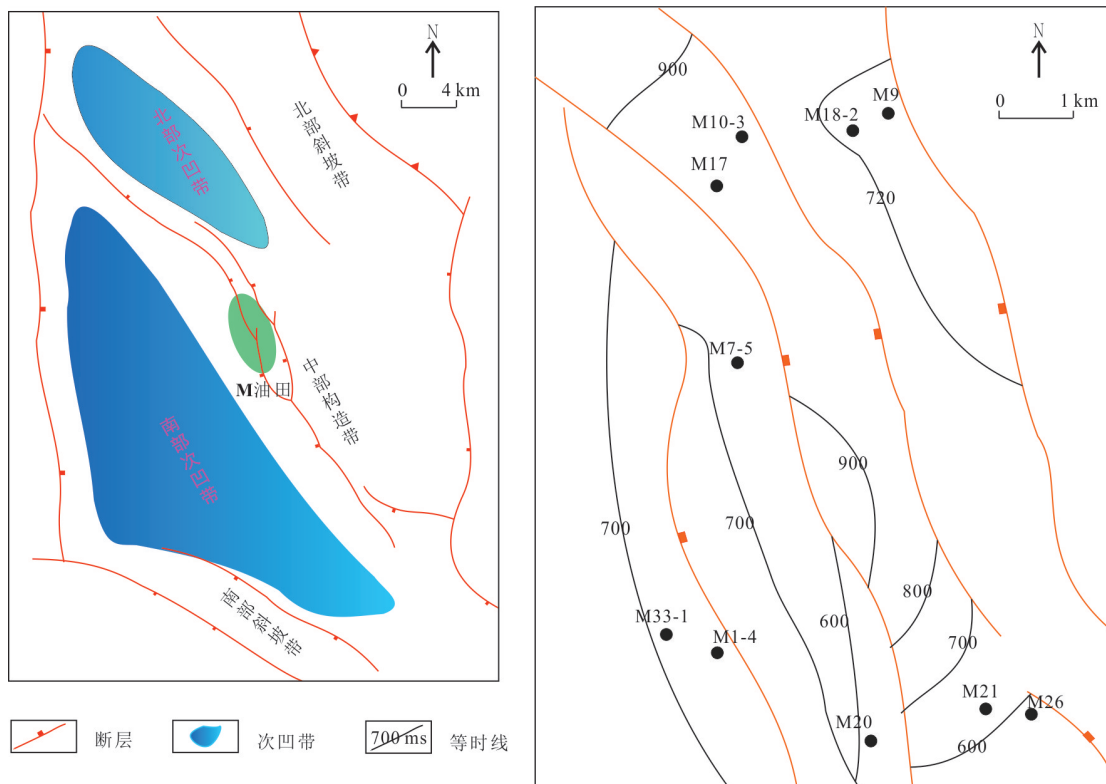


图 1 Fula 坳陷 M 油田分布(据 Dou *et al.*, 2013 修改)

Fig.1 Distribution of M oil fields in Fula depression(modified by Dou *et al.*, 2013)

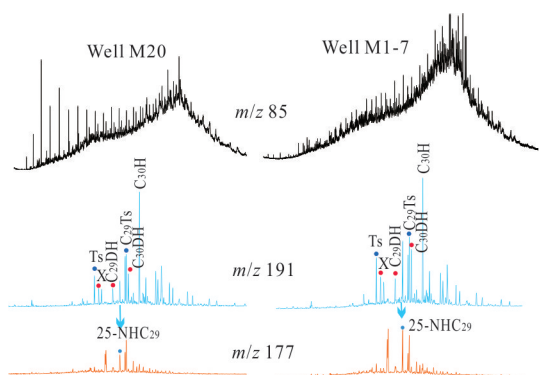


图 2 Fula 坳陷原油链烷烃和萜烷分布对比

Fig.2 Distributions of chain alkanes and terpane in crude oil from Fula depression

X. 早洗脱重排藿烷(early-eluting rearranged hopane); C₂₉DH. C₂₉重排藿烷(C₂₉-diahopane); C₃₀DH. C₃₀重排藿烷(C₃₀-diahopane); C₃₀H. C₃₀藿烷(C₃₀-hopane); 25-NHC₂₉. 25-降藿烷(25-norhopane)

整,但基线凸起明显,25-降藿烷发育,且正构烷烃、萜烷系列、甾烷系列分布完整,二次充注明显(图 2);在 *m/z*191 色质谱图中原油普遍发育 18 α (H)-新藿烷系列(C₂₉Ts、Ts)、17 α (H)-重排藿烷系列(C₃₀DH、C₂₉DH)、早洗脱重排藿烷(X)(图 2)。

Fula 凹陷 M 油田原油样品 $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ - $\alpha\alpha\alpha C_{28}$ - $\alpha\alpha\alpha C_{29}$

均呈“V”字形, $\alpha\alpha\alpha C_{27}/C_{29} \geq 1$,反映了油源母质组成具有混源的特征,且以低等水生生物为主,具有低等水生生物与陆源高等植物对有机质的双重贡献,在 $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ - $\alpha\alpha\alpha C_{28}$ - $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 三角图中,原油分布集中,主要位于混源区和浮游植物区,印证了原油母质相似以混源为主(图 3a);在表征母源特征的三环萜烷和四环萜烷参数对比图中,原油样品点分布集中,进一步说明 M 油田原油母质类型一致(图 3b)。伽马蜡烷常常用来反映母源岩沉积时水体盐度分层程度,丰度高指示水体盐度分层明显,伽马蜡烷指数与升藿烷指数相关图中,原油样品点集中,反映了油源母质环境类似,为淡水—微咸水的沉积环境(图 3c);Peters *et al.*(2005)研究认为 22R-C₃₁藿烷/C₃₀藿烷比值小于 0.25 代表湖相环境,大于 0.25 代表海相环境,Fula 坳陷 22R-C₃₁藿烷/C₃₀藿烷比值分布在 0.16~0.25 之间,为湖相环境(图 3d)。以上分析综合反映了油源母质具有相同的沉积—有机相。

利用双质谱分离鉴定甾烷系列化合物,根据 C₂₉甾烷异构体 [20S/20(S+R)-aaaC₂₉甾烷、 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ -C₂₉甾烷] 计算成熟度,其结果表明原油参数值略有差异,属于成熟阶段生成的原油(图 3e);在三芳甾烷参数与藿烷异构体参数对比图中,原油参数

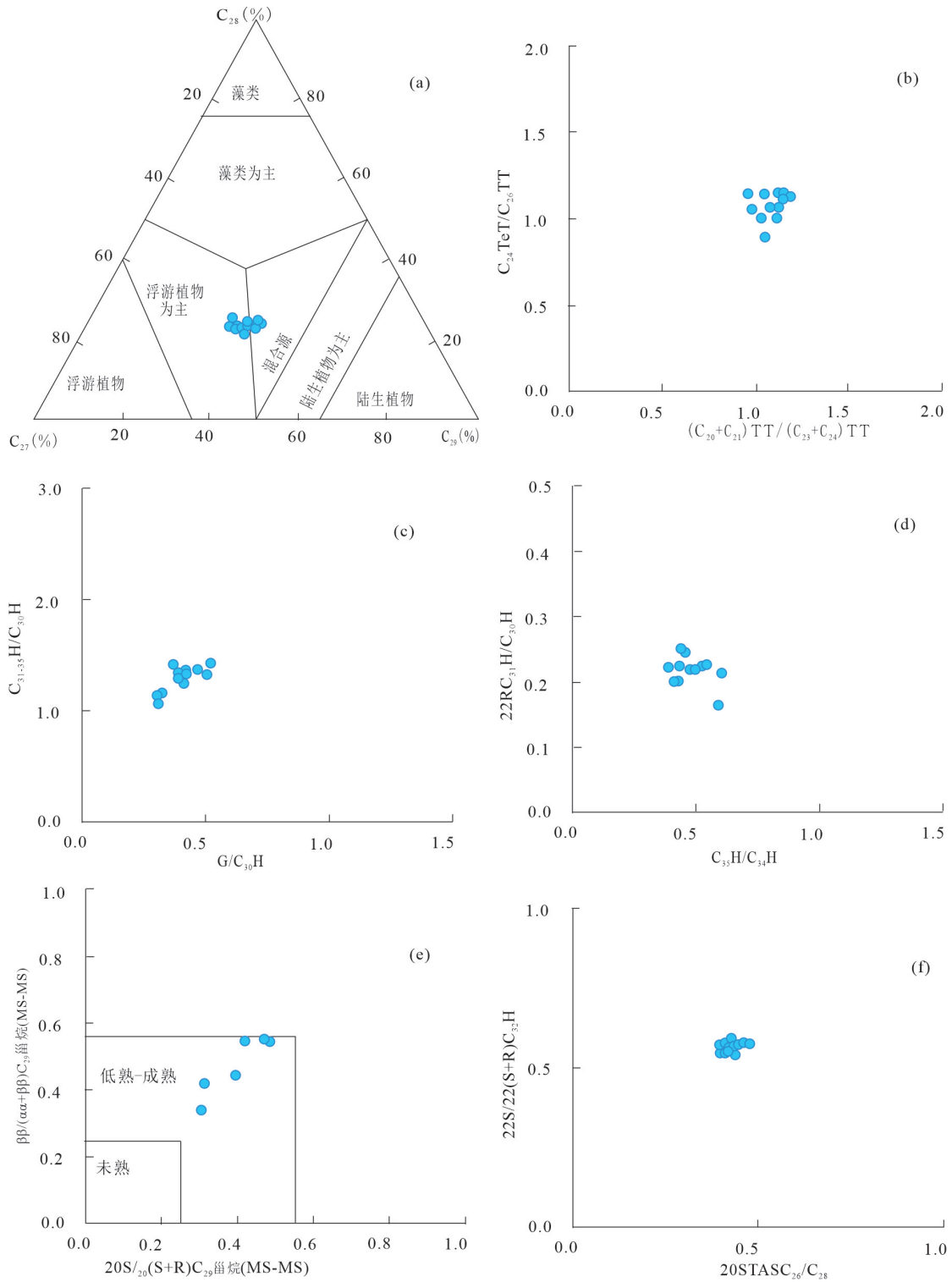


图 3 Fula 凹陷原油地球化学成因判别

Fig.3 Crude oil geochemical genesis discriminant diagrams Fula depression

TeT, 四环萜烷; TT, 三环萜烷; H, 藿烷; G, 伽马蜡烷; TAS, 三芳萜烷

分布集中在 0.5 左右, 也表明样品属于成熟原油. 利用甲基菲指数 MPI_1 计算成熟度 $R_c = 0.6 \times MPI_1 + 0.4$ (Radke, 1988), 原油成熟度分布在 0.60~0.84 之

间, 属于成熟原油. 结合前文综合分析认为 M 油田原油属于同一族群.

3 成熟度对重排藿烷分布的影响及油气运移示踪标志物有效性分析

3.1 不同参数油气示踪机理

咪唑类含氮化合物作为非烃馏分,以其独特的N-H氢键(图4中A),易于形成具有明显地质意义的地色层分馏效应,被广泛运用于示踪石油充注过程.根据咪唑类分子碳数排序位置,将分布于不同碳位上的取代基化合物分为屏蔽型、暴露型,从而可以得出众多的运移参数.

有研究人员认为烷基二苯并噻吩类(DBTs)杂环化合物以其良好的热力学属性(图4中B),不仅作为有效的成熟度参数,结合England的油藏充注模式,还能作为很好的示踪油藏充注途径的分子标志物.对于该类化合物的成熟度属性,众多学者提取了含甲基、二甲基的成熟度参数,其中Connan *et al.* (1986)、Radke *et al.* (1988)提出了甲基二苯并噻吩成熟度参数:MDR=4-MDBT/1-MDBT;Chakhmakhev *et al.* (1997)、Santamaría-Orozco *et al.* (1998)等提出两项二甲基二苯并噻吩成熟度参数:2,4-/1,4-DMDBT和4,6-/1,4-DMDBT;这些参数横跨热演化作用的低成熟到过成熟阶段(Wang *et al.*, 2000, 2004),应用范围宽广,这类参

数也被用作示踪油藏充注途径.

黄海平等(1994)通过研究18 α (H)-新藿烷系列、17 α (H)-重排藿烷系列、藿烷系列的分子结构(图4中C、D、E),认为重排藿烷C₃₀DH在色谱-质谱上分子离子峰(m/z 412)较强,但是基峰(m/z 191)相对弱些,观察其分子结构认为C₈-C₁₄键的空间排列并不紧密,C环具有较弱的剪切力,分子离子有较高的稳定性,计算重排藿烷与藿烷生成热C₃₀DH为76.1 kJ/mol, C₃₀H为82.2 kJ/mol,热稳定性上C₃₀DH>C₃₀H(Obermajer *et al.*, 2002),从热力学角度上,C₃₀DH/C₃₀H参数具有成熟度意义(Li *et al.*, 2008, 2009),能表征同一油藏内部微观的成熟度差异,参数满足England *et al.* (1987)人建立的油藏充注模式的示踪机理.

3.2 C₃₀DH示踪油藏充注途径的有效参数

为了印证C₃₀DH/C₃₀H参数示踪油气充注的有效性,首先验证参数的成熟度属性,及其对油藏成熟度的微观差异.在图3中Fula凹陷M油田原油无论在源岩母质类型还是沉积环境上分布均较集中,来源于同一沉积-有机相源岩,族群一致,且在芳烃参数、藿烷异构化参数图上原油成熟度无明显差异.但是在藿烷相关参数图上,Ts/(Ts+Tm)与C₃₀DH/C₃₀H具有非常明显的正相关性(图5a),不仅

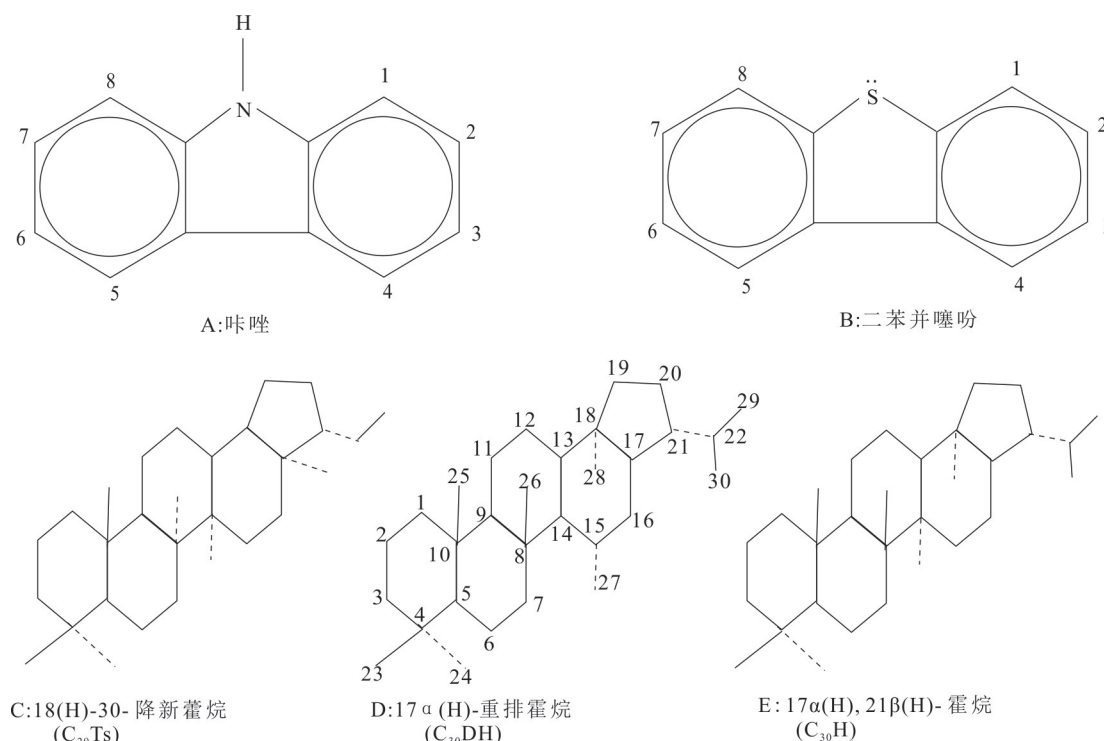
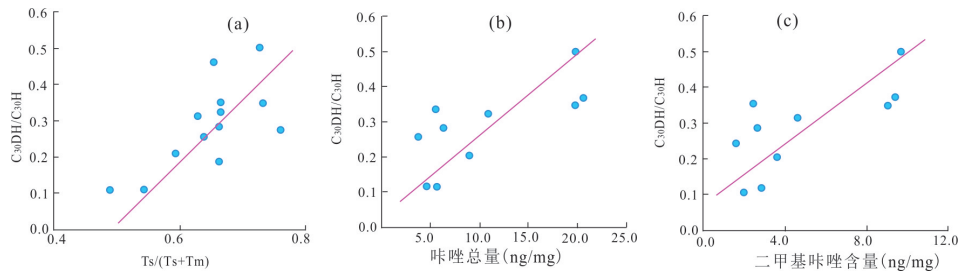


图4 咪唑、二苯并噻吩、藿烷系列结构

Fig 4 Structures of hopane, carbazoles and dibenzothiophenes compounds

图5 $C_{30}DH/C_{30}H$ 与 $Ts/(Ts+Tm)$ 、咪唑类含氮化合物含量相关图Fig.5 $C_{30}DH/C_{30}H$ with $Ts/(Ts+Tm)$ and Carbazole contains nitrogen compounds correlation diagram

说明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数具有良好的成熟度属性,同时表明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数可以刻画油藏成熟度的细微差异。

经典的示踪参数咪唑类含氮化合物在示踪石油运移充注过程中的重要表现在于随着运移距离增加,咪唑类含氮化合物含量下降,这也是地色层效应的宏观表现。利用Fula凹陷M油田含氮化合物总含量以及相对高含量的二甲基咪唑含量与 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数作进行对比(图5b、图5c),两者之间正相关明显,即随着运移距离的增加, $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数值是降低的,运移分馏效应明显。

因此,综合萘烷、咪唑类参数及含量,认为 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数热力学效应、运移分馏效应显著,可以有效地作为示踪油气运移的参数。

3.3 $C_{30}DH/C_{30}H$ 的充注效果分析

M油田位于Fula凹陷东部斜坡带,油藏属于断背斜油气藏(图1)。Fula凹陷生油岩主要为Abu Gabra组中部厚层暗色泥岩段,平面上主要分布在西部,对Fula凹陷Abu Gabra组泥岩段热解分析认为,Abu Gabra组泥岩TOC>2%,属于好—极好烃源岩, $R_o>0.6\%$,现今位于生排烃高峰(于潮等,2007)。油藏主要位于Abu Gabra组上段、Bentiu组及Aradeiba组砂岩储层中,属于下生上储成藏组合,砂岩呈厚层连续分布,储层物性优越,属于高孔高渗储层(聂昌谋等,2004)。M油田主要发育断背斜、断鼻、断块构造油藏,油藏内部发育北北西向正断层,控制着M油田的构造主体格局及圈闭分布。

本文所取原油样品在M油田各种类型油藏中均有分布,利用咪唑类总含量及二甲基咪唑类含量示踪各油藏原油充注运移的先后顺序(图6):从各井点咪唑类含量的减小趋势上看,油气充注运移方向从北端的M10-3、M17油藏开始运移,经由中部M7-5油藏再向西南部M1-4油藏及东南部M21-M26油藏运移,主要运移方向是由北向南;同时发

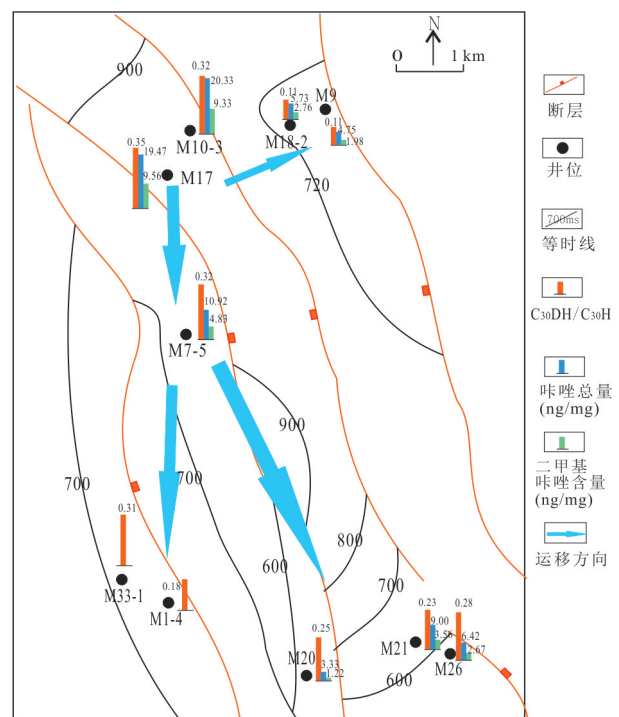


图6 Fula凹陷M油田油藏充注方向示意图

Fig.6 Schematic diagram of oil migration orientation of M oil field, in Fula depression

育一支自西向东方向的油气运移途径,即由M10-3、M17油藏运移至M18-2油藏。

从各井点 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数分布上来看(图6):最大参数值分布在M油田北端M17、M10-3油藏,紧随其后是中部M7-5油藏,参数值最小的油藏主要是南段M1-4油藏、M21-M26油藏,同时最小参数值还分布在东部M18-2油藏; $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数所示踪的油气运移充注的路径与咪唑类所示踪的途径具有一致性。综合咪唑类参数和 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数变化趋势,在平面上刻画出两类参数所示踪的途径显示,油气运移充注的主要途径是由北向南运移,其次是由西向东运移。

同时在构造背景上(图1、图6):北端M10-3、

M17油藏所处构造深度为900~800 ms,位于构造线最底端,M7-5油藏位于700 ms左右,M33-1/M1-4油藏位于680 ms左右,南部M26-M21油藏位于600 ms左右,为构造高点;而东西方向上,东部M18-2油藏位于720 ms以内高于西端M10-3、M17油藏所处构造深度.综合分析认为:作为被断层复杂化的背斜构造,背斜核部位于南部M26-M21油藏附近,而北端M10-3/M17油藏基本上属于构造翼部,从构造角度上分析,油藏充注运移方向应该由翼部到核部.因此由 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪的油气充注运移方向吻合构造背景,符合石油地质特征及油气充注原理(England *et al.*, 1987),说明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪油气运移的准确性.

从分子结构入手,分析认为重排藿烷 $C_{30}DH$ 分子结构稳定性优于藿烷, $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数是一项良好的成熟度参数,同时 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数与咪唑的良好正相关性,表明 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数是良好的示踪油气充注运移途径的分子参数.

4 结论

(1)重排藿烷 $C_{30}DH$ 分子结构稳定性优于藿烷、新藿烷系列,重排藿烷生成热最小,热稳定性高于 $C_{30}H$, $C_{30}DH/C_{30}H$ 可以作为一项有效的成熟度参数;对比 $C_{30}DH/C_{30}H$ 与咪唑类参数,发现两者之间具有良好的正相关性;综合表明,对于同一族群的原油 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数可以有效地示踪油藏充注途径和方向.

(2)Fula凹陷M油田原油具有相似的母质来源,以低等水生生物略占优势的混合源为主,母源环境为淡水—半咸水湖相,即来源于同一沉积—有机相的Abu Gabra组湖相暗色泥岩.

(3)以Fula凹陷M油田油藏为例,利用 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪油气充注运移途径,并与咪唑类参数所示踪的方向进行对比,两种参数具有一致的指向性,且吻合构造背景,证实了 $C_{30}DH/C_{30}H$ 参数示踪油气充注运移途径的有效性,M油田油藏主要由北向南充注运移,同时还发育由西向东运移.

致谢:感谢长江大学包建平教授、何文祥教授、徐耀辉教授、宋焕新副教授对论文的指导;感谢各位审稿专家对论文的悉心指导和有益建议,一并致以诚挚谢意.

References

- Chakhmakhchev, A., Suzuki, M., Takayama, K., 1997. Distribution of Alkylated Dibenzothiophenes in Petroleum as a Tool for Maturity Assessments. *Organic Geochemistry*, 26(7/8): 483–489. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00022-3)
- Connan, J., Bouroulllec, J., Dessort, D., et al., 1986. The Microbial Input in Carbonate-Anhydrite Facies of a Sabkha Palaeoenvironment from Guatemala: A Molecular Approach. *Organic Geochemistry*, 10(1/2/3): 29–50. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90007-0)
- Dou, L. R., Cheng, D. S., Li, Z., et al., 2013. Petroleum Geology of the Fula Sub-Basin, Muglad Basin, Sudan. *Journal of Petroleum Geology*, 36(1): 43–60. <https://doi.org/10.1111/jpg.12541>
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M., et al., 1987. The Movement and Entrapment of Petroleum Fluids in the Subsurface. *Journal of the Geological Society*, 144(2): 327–347. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.2.0327>
- Farrimond, P., Telenaes, N., 1996. Three Series of Rearranged Hopanes in Toarcian Sediments. *Organic Geochemistry*, 25(3–4): 165–177. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(96\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00127-1)
- Huang, H. P., Lu, S. N., Yuan, P. L., 1994. The New Discovered Diahopanes in the Paleozoic Sediments and Their Significance in Petroleum Exploration(in Chinese). *Natural Gas Geoscience*, 5(3): 23–28(in Chinese with English abstract).
- Kolaczowska, E., Slougui, N. E., Watt, D. S., et al., 1990. Thermodynamic Stability of Various Alkylated, Dealkylated and Rearranged 17α - and 17β - Hopane Isomers Using Molecular Mechanics Calculations. *Organic Geochemistry*, 16(4/5/6): 1033–1038. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90140-u](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90140-u)
- Li, M. W., Larter, S. R., Stoddart, D., et al., 1995. Fractionation of Pyrrolic Nitrogen Compounds in Petroleum during Migration: Derivation of Migration-Related Geochemical Parameters. *Geological Society, London, Special Publications*, 86(1): 103–123. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1995.086.01.09>
- Li, M. J., Wang, T. G., Liu, J., et al., 2008. Total Alkyl Dibenzothiophenes Content Tracing the Filling Pathway of Condensate Reservoir in the Fushan Depression, South China Sea. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 51(S2): 138–145. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-6025-6>
- Li, M. J., Wang, T. G., Liu, J., et al., 2009. Biomarker 17α (H)-Diahopane: A Geochemical Tool to Study the Petro-

- leum System of a Tertiary Lacustrine Basin, Northern South China Sea. *Applied Geochemistry*, 24(1): 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.09.016>
- Moldowan, J. M., Fago, F. J., Carlson, R. M. K., et al., 1991. Rearranged Hopanes in Sediments and Petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11): 3333–3353. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90492-n](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90492-n)
- Nie, C. M., Cheng, F. J., Bai, Y., et al., 2004. Geological Characteristics of Fula Oilfield in Muglad Basin, Sudan. *Oil & Gas Geology*, 25(6): 671–676 (in Chinese with English abstract).
- Obermajer, M., Osadetz, K. G., Fowler, M. G., et al., 2002. Delineating Compositional Variabilities among Crude Oils from Central Montana, USA, Using Light Hydrocarbon and Biomarker Characteristics. *Organic Geochemistry*, 33(12): 1343–1359. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(02\)00118-3](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(02)00118-3)
- Peters, K. E., Walters, C. C., Moldowan, J. M., 2005. The Biomarker Guide. Cambridge University Press, Cambridge.
- Radke, M., 1988. Application of Aromatic Compounds as Maturity Indicators in Source Rocks and Crude Oils. *Marine and Petroleum Geology*, 5(3): 224–236. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90003-7)
- Santamaría-Orozco, D., Horsfield, B., di Primio, R., et al., 1998. Influence of Maturity on Distributions of Benzo- And Dibenzothiophenes in Tithonian Source Rocks and Crude Oils, Sonda de Campeche, Mexico. *Organic Geochemistry*, 28(7/8): 423–439. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(98\)00009-6](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(98)00009-6)
- Smith, M., Bend, S., 2004. Geochemical Analysis and Familial Association of Red River and Winnipeg Reservoired Oils of the Williston Basin, Canada. *Organic Geochemistry*, 35(4): 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.01.008>
- Telnaes, N., Isaksen, G. H., Farrimond, P., 1992. Unusual Triterpane Distributions in Lacustrine Oils. *Organic Geochemistry*, 18(6): 785–789. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(92\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(92)90047-2)
- Wang, C. J., Fu, J. M., Sheng, G. Y., et al., 2000. Geochemical Characteristics and Applications of 18 α (H)-Neohopanes and 17 α (H)-Diahopanes. *Chinese Science Bulletin*, 45(19): 1742–1748. <https://doi.org/10.1007/bf02886257>
- Wang, T. G., He, F. Q., Li, M. J., et al., 2004. Alkyl-dibenzothiophenes: Molecular Tracers for Filling Pathway in Oil Reservoirs. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2399–2404. <https://doi.org/10.1007/bf03183429>
- Xiao, Z. Y., Huang, G. H., Lu, Y. H., et al., 2004. Rearranged Hopanes in Oils from the Quele 1 Well, Tarim Basin, and the Significance for Oil Correlation. *Petroleum Exploration and Development*, 31(2): 35–37 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Bai, Y., Yu, Z. Y., et al., 2007. Reservoir Formation and Oil and Gas Distribution of Fula Oilfield, Sudan. *Petroleum Exploration and Development*, 34(5): 633–639 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., 2013. Research and Prospects of Genesis of High Abundant Rearranged Hopanes in Geological Bodies (in Chinese). *Journal of Oil and Gas Technology*, 35(9): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Bian, L. Z., et al., 2007. The Xiamaling Oil Shale Generated through Rhodophyta over 800 Ma ago. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 50(4): 527–535. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0012-1>
- Zhang, W. Z., Yang, H., Hou, L. H., et al., 2009. Distribution and Geological Significance of 17 α (H)-Diahopanes from Different Hydrocarbon Source Rocks of Yanchang Formation in Ordos Basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(7): 965–974. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0076-1>

附中文参考文献

- 黄海平, 卢松年, 袁佩兰, 1994. 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. *天然气地球科学*, 23(5): 23–28.
- 聂昌谋, 陈发景, 白洋, 等, 2004. 苏丹 Fula 油田油藏地质特征. *石油与天然气地质*, 25(6): 671–676.
- 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等, 2004. 库车凹陷却勒 1 井原油的重排藿烷系列及油源对比. *石油勘探与开发*, 31(2): 35–37.
- 于潮, 白洋, 于中洋, 等, 2007. 苏丹 Fula 油田成藏规律与油气分布. *石油勘探与开发*, 34(5): 633–639.
- 张敏, 2013. 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. *石油天然气学报*, 35(9): 1–4.