

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.144>



塔里木盆地北部 YM32 下古生界潜山油气藏油气运移

管文胜^{1,2}, 韩剑发², 刘永福², 查明¹, 杨淑雯², 吴梅莲², 苏洲², 刘博²

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580
2. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要: YM32 下古生界潜山油气藏是受断裂控制的低幅度油气藏, 油气运聚复杂. 结合新钻井的地球化学分析数据, 对研究区油气藏油气运移规律进行剖析. 依据 YM32 下古生界潜山气田藏的原油及抽体物样品中的饱和烃的烷烃、甾萜烷, 芳烃的萘与菲、烷基二苯并噻吩、三芳甾烷等生物标志化合物进行系统分析, 优选油气示踪参数, 并归一化, 结合族组分分析结果, 形成了油气运移示踪二步法. 综合研究发现, YM32 下古生界潜山油气藏有 YM342-YM343 和 YM322 两个油气充注点, 以及 YM342-YM343→YM34-1H→YM32、YM342-YM343→YM34-7H→YM33、YM342-YM343→YM37-YM35, 以及 YM322→YM321→YM32 共 4 条油气运移路径, 并在 YM342-YM343→YM37-YM35 油气运移路径上, 发现 2 个资源量超过 1.00×10^6 t 的潜力圈闭. 单参数与油气运移示踪二步法都可以反映油气运移路径, 而后者具有全面、直观、准确地表征油气运移路径的特点.

关键词: 潜山油气藏; 油气运移; 烃类化合物; 归一化; 饱芳比; 二步法; 油气.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2020)04-1315-12

收稿日期: 2019-06-13

Characteristics of Hydrocarbon Migration of YM32 Lower Paleozoic Buried Hill Reservoirs in North Tarim Basin

Guan Wensheng^{1,2}, Han Jianfa², Liu Yongfu², Zha Ming¹, Yang Shuwen², Wu Meilian², Su Zhou², Liu Bo²

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

Abstract: The YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoir is a low-amplitude reservoir controlled by faults, which is characterized by complex migration and accumulation of oil and gas. Firstly, combined with the geochemical analysis of new drilling data, the oil and gas migration law of oil and gas reservoirs in the study area is analyzed. Then, based on the biomarker compounds, alkanes and steroid terpane from saturated hydrocarbon, naphthalene and phenanthrene, DBTs and TAS from aromatic hydrocarbons in the samples of crude oil and extracts from the YM32 Paleozoic buried hill reservoir, the tracer parameters of oil and gas are optimized. Finally, a step-by-step method of hydrocarbon migration tracer is formed by normalization, in combination with the results of group composition analysis. Results show that there are two filling points of YM342-YM343 and YM322 in the YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoir, as well as four migration paths of YM342-YM343 to YM34-1H to YM32, YM342-YM343 to YM34-7H to YM33, YM342-YM343 to YM37-YM35, and YM322 to YM321 to YM32. On the migration path of YM342-YM343 to YM37-YM35, two potential traps with more resources than 1.00×10^6 t were found. Both the single parameter and the two-step method of hydrocarbon migration tracer can reflect the migration path of oil and gas, and the latter has the characteristics of comprehensive, intuitive and accurate characterization of the migration path of oil and gas.

基金项目: 国家重大专项 (Nos. 2017ZX05001-001, 2016ZX05001).

作者简介: 管文胜 (1968—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事圈闭研究、油气运移、断裂控藏方面的研究. ORCID: 0000-0003-3505-1724.

E-mail: guanws-tlm@petrochina.com.cn

引用格式: 管文胜, 韩剑发, 刘永福, 等, 2020. 塔里木盆地北部 YM32 下古生界潜山油气藏油气运移. 地球科学, 45(4): 1315-1326.

Key words: buried hill reservoirs; oil and gas migration; hydrocarbon compound; normalization; saturated to aromatic hydrocarbon ratio; step-by-step method; hydrocarbons.

0 引言

石油中烃类化合物分为饱和烃和芳烃两大类,该化合物可以提供生油母岩的成熟度、沉积环境,以及油气运移等方面的信息.饱和烃中的正构烷烃在油气运移中会发生短链、小分子量化合物易于运移,顺着运移方向相对地富集的现象(查明,1997);异构烷烃用于判断源岩类型与环境差异(莫晓旖等,2011);甾萜烷用以分析原油成熟度及油气藏的充注点(陈中红等,2010;王倩茹等,2018).芳烃具有更强的抗生物降解能力,在成熟度和油气示踪方面的应用范围广(朱战军等,2009;马军等,2010;郝鑫等,2016).芳烃比饱和烃的极性更强,而非烃化合物(胶质、沥青质)分子大,极易被矿物表面吸附.因此,随着横向运移距离的增大,原油中的胶质、沥青质和芳香烃含量都降低,造成了原油中的饱芳比、总烃占比等变大.同样,油气在纵向运移过程中发生分馏作用,使得自下而上,芳香烃含量降低、饱芳比增加(王东良等,2007;许婷等,2017).芳烃化合物的多环芳烃、芳烃甾萜烷及烷基二并苯噻吩类 DBTs 的研究表明,沿着运移方向,甲基菲比 MPR、甲基菲指数 MPI1、甲基菲分布分数 F_1 和 F_2 值以及三芳甾烷 TAS 同样是逐渐增加,而烷基二并苯噻吩类的 4-MDBT/1-MDBT、2,4-/1,4-DMDBT 和 4,6-/1,4-DMDBT 则减小,主要是苯环的不同碳位上具有取代基的烷基二并苯噻吩异构体呈现出热稳定性的差异引起的(罗健等,2001;王铁冠,2005).前人对饱和烃和芳烃联合研究主要集中在烃源岩对比和油气输导体系,而对油气示踪研究少有报道(卢政环等,2016;周叶骏等,2018).YM32 下古生界油气藏前期评价和开发效果好,由于该油气藏聚集复杂,地化资料少,油气运移研究少,后期失利井增多.本文在 YM32 下古生界潜山油气藏近三年来新钻井的饱和烃和芳烃的油气示踪地球化学参数分析基础上,对反映油气运移的参数进行优选,再对所选参数归一化,与族组分分析资料有机结合,形成了一种油气示踪的二步法,以指导该油气藏的滚动评价和开发.

1 地质背景

YM32 下古生界潜山油气藏位于塔里木盆地塔北隆起轮台凸起西段的 YM32 下古生界潜山带上,北邻库车坳陷.按照产层的不同,划分为以 YM34 为代表的志留系柯坪塔格组(S1k)油气藏和以 YM32 为代表的寒武系—奥陶系油气藏(图 1).YM34 志留系油气藏在 2006 年获得发现,对该油气藏的地球物理、地质、地球化学特征等进行研究,认为塔北隆起轮台凸起西段的烃源岩主要来自其北面库车坳陷的上三叠统黄山街组(T_3h)湖相泥岩,少数来自下侏罗统的阳霞组(J_3y)煤系泥岩,白垩系底部与志留系顶部的风化壳以及断层,共同构成油气运移的输导体系(梁狄刚等,2002;苏劲等,2012;管文胜等,2015).近年来,随着地震处理和解释技术的进步,发现 YM342、YM343 志留系低幅度油气藏,获取了丰富的地球化学资料(管文胜等,2017).YM34 志留系油气藏原油物性、族组分和饱和烃质谱—色谱分析表明,该油气藏东西分带明显,以 YM342、YM343 等井为代表的西部原油具有低密度、低黏度、低饱芳比的特征.本次对 YM32 下古生界油气藏的原油及抽提物的烃类化合物进行色谱、色谱—质谱分析,选取饱和烃的 $\sum nC_{21}-/\sum nC_{22}+$ 、Pr/Ph、 C_{27} 三降藿烷等,以及芳烃的萘和菲系列化合物、烷基二并苯噻吩、三芳甾烷等参数,对 YM32 下古生界潜山油气藏的油气运移展开研究.

2 族组分特征

YM32 下古生界潜山油气藏的原油及抽汲物总烃含量高,介于 61.76%~85.67%,平均值 76.1%,其中 YM342 等井的值大于平均值, YM34-1H 等井的值小于平均值,接近最小值区.饱和烃介于 53.2%~71.14%,芳香烃介于 8.56%~19.93%,饱芳比介于 3.10~7.86, YM342、YM343 和 YM32 等井的饱芳比略大于 3,为低值分布区.

3 饱和烃特征

YM32 下古生界潜山油气藏原油的正构烷烃具有单峰型特征,显示有机质母质可能是单一来源.

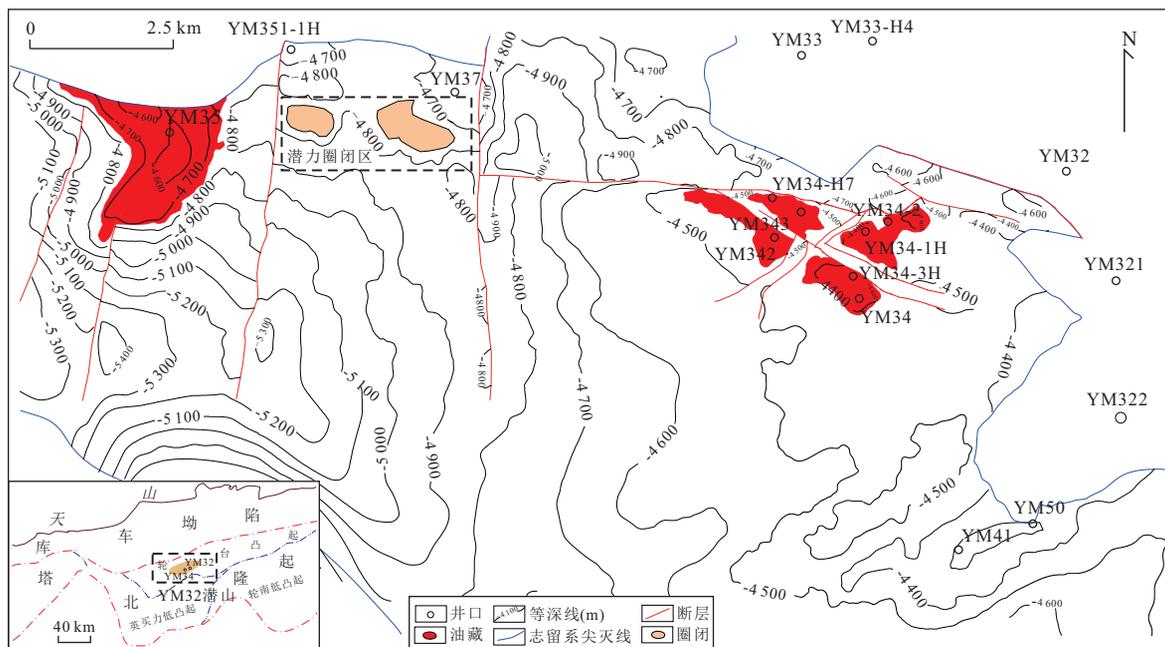


图1 YM32下古生界潜山油气藏构造位置

Fig.1 Tectonic map of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

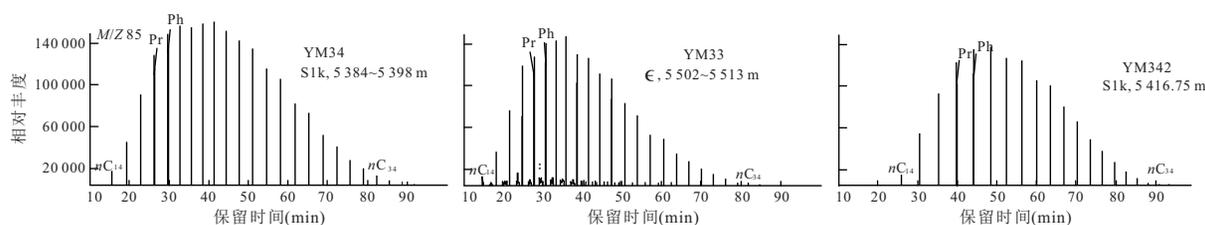


图2 YM32下古生界潜山油气藏饱和烃总离子流

Fig.2 TIC of saturated hydrocarbons of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

碳数分布在 $nC_{10} \sim nC_{36}$ 之间,主峰碳数在 $nC_{14} \sim nC_{29}$ 之间,碳优势指数 CPI 值略大于 1,奇偶优势不明显,属于成熟原油(图 2,表 1)。油气在运移过程中会发生“地质色层”效应,正构烷烃相对短链、小分子量化合物较长链、大分子量的化合物易于运移,并顺着运移方向相对地富集,因此 $\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$ 以及 $(nC_{21} + nC_{22}) / (nC_{28} + nC_{29})$ 的比值也会增大(吕修祥等, 2010)。YM32 下古生界潜山油气藏的 $\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$ 值和 $(nC_{21} + nC_{22}) / (nC_{28} + nC_{29})$ 值分别在 0.48~4.29 和 1.62~3.61 之间, YM34 志留系油气藏西部的 YM342 井、YM343 井的上述二项值分别在 0.48~0.55 和 1.62~2.25 之间,均处于低值区;东部的 YM34、YM34-1H 等井的上述二项值明显大于西部的值,表明 YM34 志留系油气藏的油气可能是由西向东进行充注(表 1,图 3a)。

姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)的比值 Pr/Ph 常用于研究母岩输入类型和沉积环境的氧化还原程度(蒋有

录和查明, 2010; 郭晓博, 2013; 张渠等, 2014)。YM32 下古生界潜山油气藏原油的 Pr/Ph 值在 0.83~2.23 之间,母岩处于弱还原—弱氧化环境。YM342 井、YM343 井的值小于 1.2,为该潜山油气藏原油 Pr/Ph 值的低值区,可能处于弱还原的湖相环境(图 3a, 表 1);YM34 井、YM34-2 井等和 YM32 井等的 Pr/Ph 值分别在 1.39~1.99 和 1.61~2.03,依次增大,表明原油所处的环境自西向东具有向氧化环境变化的趋势,与原油密度向东变大一致,二者有一定的联系。YM32 下古生界潜山油气藏原油的 Pr/ nC_{17} 和 Ph/ nC_{18} 值分布在 0.16~0.69 和 0.08~0.16 之间, YM342 井、YM343 井的 Pr/ nC_{17} 、Ph/ nC_{18} 值略大于邻井,而且二者呈线性关系(图 3b)。

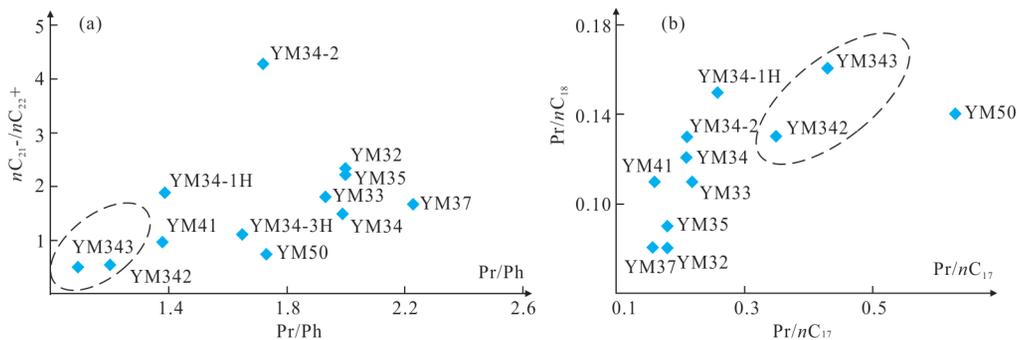
C_{27} 三降藿烷 Tm 一般会随原油成熟度增加向 Ts 转化,因而越接近油藏充注点地带, Ts/(Ts+Tm) 比值增大,成为表征原油成熟度的重要参数之一(England et al., 1987)。YM32 潜山油气藏现有原

表 1 YM32 下古生界潜山油气藏原油饱和烃地球化学参数

Table 1 Geochemical parameters of saturated hydrocarbons of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

井名	层位	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	Ts/(Ts+Tm)	20S	αββ	$\frac{\sum nC_{21}-}{\sum nC_{22}+}$	$\frac{NC_{22}/}{NC_{29}}$	CPI	OEP
YM34	S1k	1.99	0.23	0.11	0.55	0.44	0.34	1.49	1.85	1.09	1.02
YM34-3H	S1k	1.65	0.19	0.11	—	—	—	1.11	2.31	1.08	1.10
YM34-1H	S1k	1.39	0.26	0.15	0.55	0.46	0.42	1.88	1.84	1.16	1.20
YM34-2	S1k	1.72	0.21	0.13	—	—	—	4.29	3.21	1.14	1.23
YM342	S1k	1.20	0.27	0.13	0.90	0.38	0.49	0.55	1.62	1.13	1.08
YM343	S1k	1.16	0.24	0.12	0.87	0.41	0.48	0.48	1.79	1.12	1.02
YM34-H7	S1k	1.79	0.69	0.23	0.58	0.40	0.54	0.86	3.29	1.13	1.06
YM37	S1k	2.23	0.16	0.08	0.68	0.48	0.39	1.67	2.29	1.10	1.03
YM35	S1k	2.00	0.18	0.09	0.57	0.47	0.40	2.23	2.80	1.09	1.01
YM41	S1k	1.38	0.16	0.11	—	—	—	0.98	1.71	1.06	1.02
YM50	S1k	1.73	0.63	0.14	0.87	0.41	0.50	0.74	2.66	1.07	1.00
YM32	∈	2.00	0.18	0.08	0.58	0.49	0.44	2.33	2.23	1.18	1.37
YM321	∈	2.03	0.22	0.10	0.59	0.48	0.39	1.17	3.74	1.12	1.04
YM322	O	1.61	0.32	0.18	0.51	0.49	0.47	0.13	0.33	1.04	1.00
YM33	∈	1.93	0.22	0.11	0.588	0.48	0.41	1.80	3.61	1.09	1.03
YM33-H4	∈	0.83	0.28	0.11	0.551	0.45	0.45	0.59	2.35	1.10	1.07

注: —表示未测; 20S表示 $C_{29}20S/(20S+20R)$, αββ表示 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$; NC_{22}/NC_{29} 表示 $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$, 后图表同。

图 3 YM32 下古生界潜山油气藏原油 Pr/Ph 与 $\sum nC_{21}-/\sum nC_{22}+$ (a) 和 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} (b) 关系Fig. 3 The cross plots of Pr/Ph vs. $\sum nC_{21}-/\sum nC_{22}+$ (a) and Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} (b) of crude oils in YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

油及抽提物 GC/MS 资料分析表明, 其 $Ts/(Ts+Tm)$ 值分布在 0.55~0.90, 平均值 0.72. YM34 志留系油气藏西部的 YM342 井和 YM343 井的值大于 0.89, 处于极大值分布区, 为该油气藏的充注点 (表 1); 该油气藏东部的 YM34 井、YM34-1H 井等的 $Ts/(Ts+Tm)$ 值分布在 0.53~0.55, 远低于平均值. 表明 YM34 志留系油气藏油气可能是自西向东充注的.

YM34 志留系油气藏西部的 YM342 和 YM343 井, 三环萜烷系列以 C_{21} 化合物为主峰, $C_{19} \rightarrow C_{20} \rightarrow C_{21}$ 丰度依次增加, C_{24} 四环萜烷较低, $T_s \gg T_m$, 伽马蜡烷 G、重排甾烷丰度较高, 规则甾烷丰度高, 呈

“V”字型分布, $C_{27} > C_{29} > C_{28}$, C_{27} 甾烷占优势 (图 4a), 表明烃源岩的物源有水生低等生物输入 (包建平等, 2007). 东部 YM34 等井的三环萜烷系列以 C_{21} 化合物为主峰, C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 丰度的规律性不强, C_{24} 四环萜烷很低, $T_s > T_m$, 伽马蜡烷 G 中等, 重排甾烷丰度较高, 规则甾烷丰度较高, 呈“V”字型分布, $C_{29} > C_{27} > C_{28}$, C_{29} 甾烷占优势, 烃源岩的物源有高等植物输入 (图 4b).

C_{29} 甾烷的 $C_{29}(20S)/(20S+20R)$ 和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值常用来确定成熟度、油源对比和指示油气运移方向的重要指标 (黄继文, 2003; 陈文彬等, 2017). 统计分析表明, 随着原油成熟度 $Ts/$

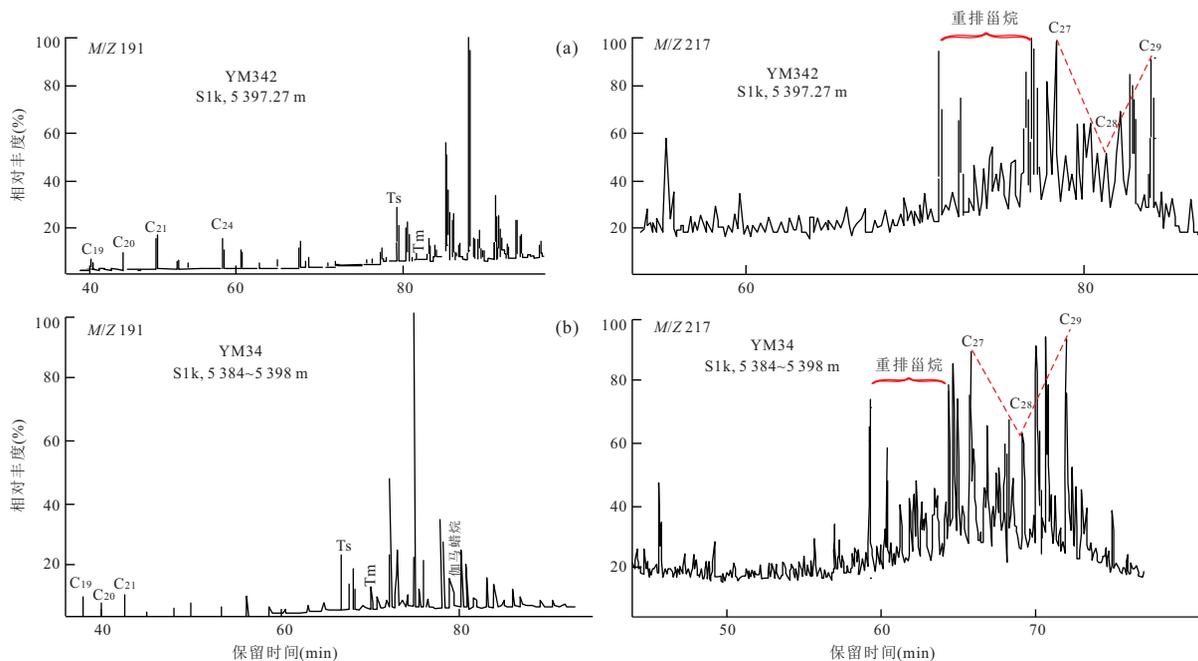


图4 YM34油气藏甾萜烷特征

Fig.4 Characteristics of steranes and terpanes in YM34 reservoir

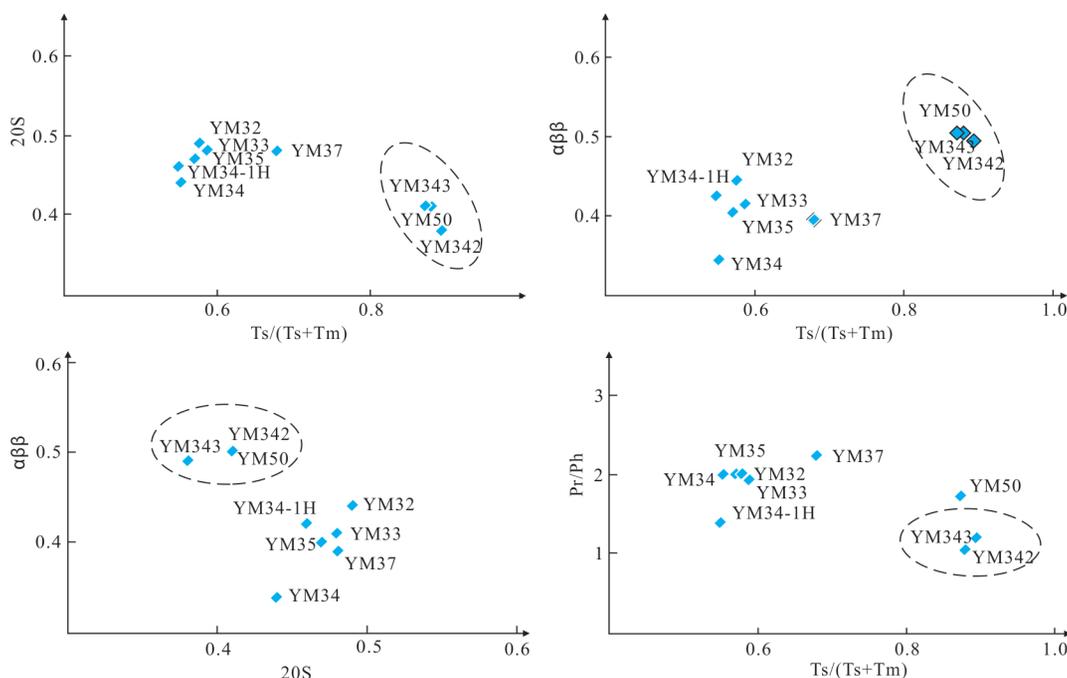


图5 YM32下古生界潜山油气藏 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 、 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 、 Pr/Ph 与 $Ts/(Ts+Tm)$ 的关系

Fig.5 The relation between $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$, $C_{29}20S/(20S+20R)$, Pr/Ph and $Ts/(Ts+Tm)$ in YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

($Ts+Tm$) 等的增大, $C_{29}(20S)/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 值也增大,与之呈正相关关系。YM32下古生界潜山油气藏原油成熟度和 C_{29} 甾烷相关性分析表明, YM342井、YM343井和YM50井的高成熟原油在 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 处于右上角的

高值区,而 $C_{29}(20S)/(20S+20R)$ 值处于右下角的较低值区,存在异常(图5)。上述分析表明, YM342井、YM343井与YM34井、YM34-1H井的规则甾烷有明显区别,暗示YM34志留系潜山油气藏东西部烃源岩有差异。

4 芳烃特征

4.1 芳烃总体分布特征

芳烃化合物在色谱图上显示有 3 个峰群:第 1 峰群为萘和烷基萘峰群,第 2 峰群为菲和烷基菲峰群,第 3 峰群为芳甾、萜类烃和其他多环芳烃峰群,以四、五环化合物为主.YM32 下古生界潜山油气藏芳烃馏分的质谱总离子流 TIC 图可见,总体特征为单峰型.根据峰群特征,可分 3 类,第 1 类为 YM342、YM343、YM50 井,萘和烷基萘峰群缺失,第 2、3 峰群发育(图 6a);第 2 类以 YM34-1H 井为代表,三甲基萘和四甲基萘发育,第 2、3 峰群发育(图 6b);第 3 类为 YM34、YM33、YM32 为代表,3 个峰群都有发育(图 6c).

4.2 萘系列化合物特征

萘系列化合物为二环芳烃,在沉积物和原油中分布广泛,主要来源于陆生高等植物,与沉积环境及有机质类型密切相关.YM32 下古生界潜山油气藏样品可检测的主要有甲基萘 MN、二甲基萘 DMN、三甲基萘 TMN、四甲基萘 TeMN 和五甲基萘 PMN,其中二甲基萘和三甲基萘丰度高,萘最低(图 7a).YM32 下古生界潜山油气藏的样品中, YM342 井、YM343 井萘系列化合物的缺失,表明其源岩的陆生高等植物不发育.

4.3 菲系列化合物特征

菲系列化合物为三环芳烃,YM32 下古生界潜山油气藏的样品可以检测出的主要有菲 P、甲基菲 MP、二甲基菲 DMP、三甲基菲 TMP,以及 MP 的四个异构体:1-MP、2-MP、3-MP 和 9-MP(图 7b).由于 1-MP 和 9-MP 比 2-MP 和 3-MP 极性相对较强,在运移过程中易被岩石吸附而滞留在后,因此,沿着运移方向甲基菲比 $MPR = (2-MP/1-MP)$ 、甲基菲分布分数 $F_1 = [(3-MP+2-MP)/(1-MP+2-MP+3-MP+9-MP)]$ 、 $F_2 = [2-MP/(1-MP+2-MP+3-$

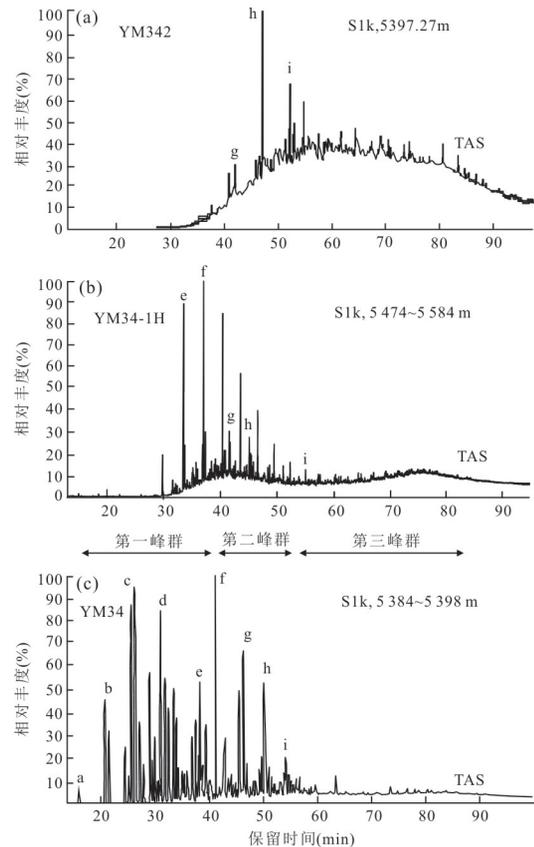


图 6 YM32 潜山油气藏芳烃化合物质量色谱图(总离子流 TIC 图)

Fig.6 The mass chromatogram of aromatic compounds of YM32 buried hill reservoirs (TIC)

a. N; b. MN; c. DMN; d. TMN; e. TeMN; f. P; g. MP; h. DMP; i. TMP

MP+9-MP)] 和甲基菲指数 $MPI1 = [1.5 \times (2-MP+3-MP) / (P+9-MP+1-MP)]$ 的值增大(梁狄刚等,2002;陈琰等,2010).YM32 下古生界潜山油气藏样品分析发现, YM34 志留系油气藏的 MPR 、 F_1 、 F_2 值自西向东增大,而 $MPI1$ 减小,是由于西部的 YM342、YM343 井等的菲值小,而东部的 YM34、YM34-1H 等井菲值较大所引起的(图 6, 图 7, 表 2).

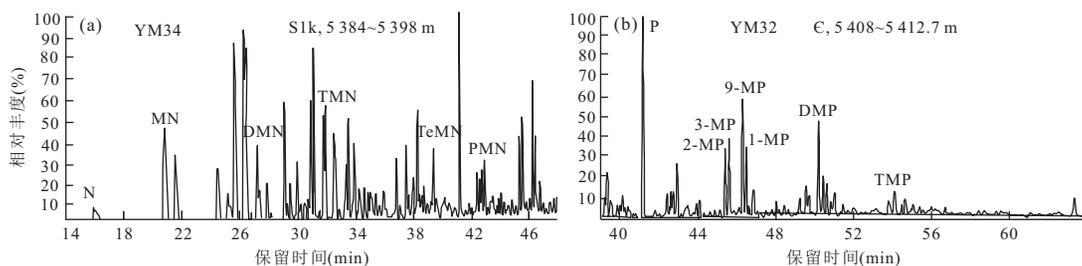


图 7 YM32 下古生界潜山油气藏芳烃化合物质量色谱图(TIC 图局部)

Fig.7 The CG/MS of aromatic compounds of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

表 2 YM32下古生界潜山油气藏样品芳烃化合物参数

Table 2 Parameters of aromatic compounds of samples in YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

井名(样品数)	样品类型	层位	MPR	F ₁	F ₂	MPI1	4-/1-MDBT	2,4-/1,4-DMDBT	4,6-/1,4-DMDBT	TASC ₂₇ (20R)/C ₂₈ (20R)
YM34	原油	S	1.27	0.48	0.25	0.64	2.31	—	—	0.65
YM34-1H	原油	S	—	0.39	0.27	0.61	3.88	1.18	1.51	0.59
YM34C	原油	S	1.34	0.48	0.27	—	—	—	—	0.63
YM342(9)	砂岩	S	1.023	0.41	0.21	1.00	5.00	1.46	2.45	0.55
YM343(4)	砂岩	S	0.94	0.39	0.19	0.93	4.90	1.45	2.58	0.49
YM50(15)	砂岩	S	1.00	0.39	0.2	0.96	4.50	1.20	2.37	0.53
YM35	原油	S	1.08	0.42	0.22	0.53	5.51	—	—	0.56
YM37	原油	S	1.16	0.44	0.23	1.15	5.84	—	—	0.65
YM39	砂岩	S	0.58	0.28	0.20	0.30	1.98	—	—	0.34
YM39	灰岩	O2y	1.62	0.59	0.30	0.44	—	—	—	—
YM32	砂岩	K	0.87	0.36	0.18	0.44	6.18	—	—	—
YM32	原油	∈	1.30	0.46	0.25	0.55	7.61	—	—	0.66
YM33	原油	∈	1.22	0.46	0.24	0.55	7.39	—	—	0.67
YM33	灰岩	∈	1.25	0.45	0.24	0.73	—	—	—	0.61
YM33-H1	原油	∈	1.26	0.46	0.26	0.79	6.49	1.61	2.7	0.54
YM33-H4	灰岩	∈	1.28	0.49	0.30	0.67	4.30	0.55	1.21	0.50
YM321	原油	∈	1.31	0.46	0.24	0.54	7.61	—	—	0.69
YM321-H4	原油	∈	1.26	0.50	0.25	0.77	5.99	1.54	2.67	0.65
YM322	原油	∈	1.26	0.46	0.26	0.96	4.18	1.36	2.32	0.57

注:“—”表示未测.

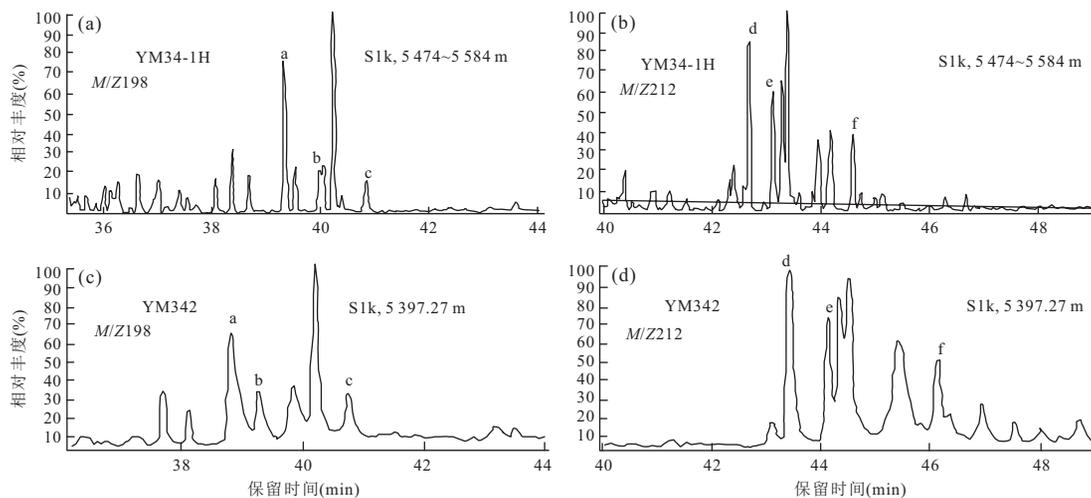


图 8 YM32下古生界潜山油气藏样品芳烃馏分质谱图

Fig.8 The GC/MS of aromatic hydrocarbon fraction of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

a.4-MDBT;b.2,3-MDBT;c.1-MDBT;d.4,6-DMDBT;e.2,4-DMDBT;f.1,4-DMDBT

4.4 烷基二苯并噻吩特征

烷基二苯并噻吩 DBTs 属于含硫芳烃类化合物. YM32下古生界潜山油气藏原油及抽体物样品分析发现, 甲基二苯并噻吩 MDBTs 有 3 个异构体, 即 1-MDBT、2,3-MDBT 和 4-MDBT(图 8a, 图 8c);

二甲基二苯并噻吩 DMDBTs 有 3 个主要异构体, 即 1,4-DMDBT、2,4-DMDBT 和 4,6-DMDBT(图 8b、图 8d). 由于热稳定性的差异, 烷基二苯并噻吩类参数 4-MDBT/1-MDBT、2,4-DMDBT/1,4-DMDBT 和 4,6-DMDBT/1,4-DMDBT 均随着运移距离的

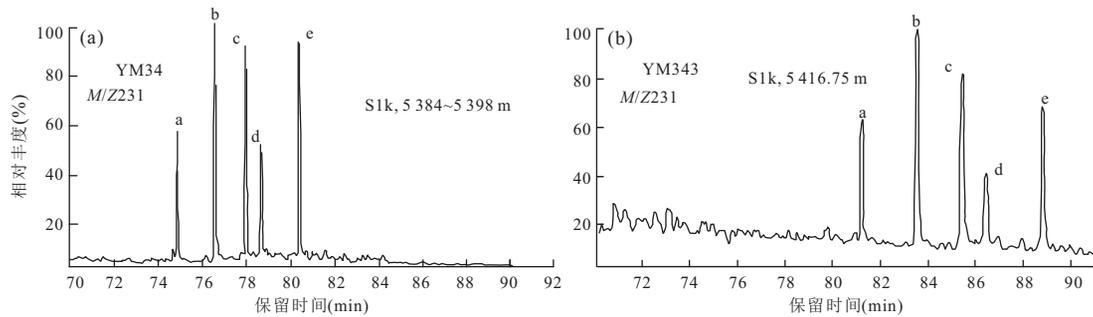


图9 M32下古生界潜山油气藏样品三芳甾烷质谱图

Fig.9 The mass chromatogram of triaromatic sterane of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

a. $C_{26}(20S)$; b. $C_{26}(20R) + C_{27}(20S)$; c. $C_{28}(20S)$; d. $C_{27}(20R)$; e. $C_{28}(20R)$

增加而具有减少的趋势,并与成熟度参数如 $T_s/(T_s+T_m)$ 呈正相关性,可以作为示踪石油充注方向与路径的参数.分析表明,YM34 志留系油气藏东部的 YM34 等井的烷基二苯并噻吩的上述 3 类参数明显小于其西部的 YM342、YM343 井,表明 YM34 志留系油气藏油气运移路径可能是自西向东(表 2).

4.5 三芳甾烷特征

在质谱图上,YM32 下古生界潜山油气藏的三芳甾烷分为低碳数($C_{19} \sim C_{22}$)和高碳数($C_{26} \sim C_{30}$)两组,高碳数的芳香甾烷具有 R 和 S 构型, $C_{26}(20R) + C_{27}(20S)$ 、 $C_{28}(20S)$ 和 $C_{28}(20R)$ 三芳甾烷 3 个化合物的丰度比 $C_{26}(20S)$ 和 $C_{27}(20R)$ 明显偏高(图 9). YM34 志留系油气藏西部的 YM342、YM343 井样品的 $TASC_{27}(20R)/C_{28}(20R)$ 均值在 0.486~0.549 之间, YM34、YM34-1H 和 YM34C 井志留系样品的 $TASC_{27}(20R)/C_{28}(20R)$ 值在 0.594~0.645 之间,可见前者明显小于后者(表 2). 分析表明沿油气运移路径,可能发生了“地质色层”效应,使得 $TASC_{27}(20R)/C_{28}(20R)$ 增大.

5 油气运移示踪二步法应用结果及意义

5.1 油气运移示踪二步法

原油及抽汲物族组分分析表明,烃类化合物所占比例大,平均 76.1%,因此其生物标志化合物可以反映油气运移特征.饱和烃、芳烃生物标志化合物分析表明, YM34 志留系油气藏的饱和烃 $\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$ 、 $(nC_{21} + nC_{22}) / (nC_{28} + nC_{29})$ 和 20S 参数值由西向东增大, $T_s/(T_s+T_m)$ 和 $\alpha\beta$ 值减小;芳烃甲基菲比 MPR、甲基菲分布分数 F_1 及 F_2 、三芳甾烷 $TASC_{27}(20R)/C_{28}(20R)$ 由西向东增大, MPI1,4-MD-

BT/1-MDBT、2,4-DMDBT/1,4-DMDBT 和 4,6-DMDBT/1,4-DMDBT 减小.这些都表明了该油气藏油气运移路径为自西向东.

在此基础上,对 YM32 下古生界潜山油气藏所有烃类化合物油气运移展开研究.由于全区部分井缺少二甲基二苯并噻吩类分析数据,而这些数据具有自西向东减小的特点,为了使更多的参数参与研究,选取了自西向东增大趋势的 7 个参数(表 3).

分析表 3 数据发现,不同参数值之间的范围有明显差异,为了减小差异,对上述 7 项参数进行归一化处理,即最大值和最小值分别赋予 1.00 和 0.00,然后根据饱芳比对已选饱和烃 3 项参数和芳烃 4 项参数进行运算,形成油气运移示踪二步法,得到综合值(表 4),运算规则:综合值 = $(20S + (\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +) + NC_{22}/NC_{29}) \times SHI + (MPR + F_1 + F_2 + TASC_{27}(20R)/C_{28}(20R)) \times AHI$,其中 $SHI = \text{饱芳比} / (1 + \text{饱芳比})$,为饱和烃系数; $AHI = 1 / (1 + \text{饱芳比})$,为芳烃系数, $SHI + AHI = 1$.

5.2 应用结果

$\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$ 可见 YM32 下古生界潜山油气藏有 2 个充注点,分别是 YM342-YM343 和 YM322,油气运移路径有 3 个,即 YM342-YM343 \rightarrow YM34-1H \rightarrow YM32, YM342-YM343 \rightarrow YM37-YM35 和 YM322 \rightarrow YM321 \rightarrow YM32(图 10a). NC_{22}/NC_{29} 同样可见 YM342-YM343 和 YM322 二个充注点,油气运移路径有 4 个,比 $\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$ 多一个路径,即 YM342-YM343 \rightarrow YM34-H7 \rightarrow YM33(图 10b). 芳烃 MPR 可见该油气藏同样可见上述的 2 个充注点,油气运移路径为 YM342-YM343 \rightarrow YM34-1H \rightarrow YM32 和 YM322 \rightarrow YM321 \rightarrow YM32(图 10c). 油气运移示踪二步法同样可见上述的 2 个充注点,即 YM342-YM343 和 YM322,油气运移路径有 4 个,即

表3 YM32下古生界潜山油气藏烃类化合物地球化学优选参数

Table 3 Parameter optimization of hydrocarbon compounds of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

井名	层位	20S	$\frac{\sum nC_{21-}}{\sum nC_{22+}}$	NC_{22}/NC_{29}	MPR	F_1	F_2	$TASC_{27(20R)}/C_{28(20R)}$	饱芳比
YM34	S1k	0.44	1.49	1.85	1.27	0.48	0.25	0.65	4.60
YM34-1H	S1k	0.46	1.88	1.84	0.84	0.39	0.21	0.59	4.87
YM342	S1k	0.38	0.55	1.62	1.02	0.41	0.21	0.55	3.17
YM343	S1k	0.40	0.50	2.02	0.94	0.39	0.19	0.49	3.10
YM34-H7	S1k	0.40	0.86	3.29	1.34	0.52	0.28	0.64	4.50
YM37	S1k	0.48	1.67	2.29	1.16	0.44	0.23	0.65	6.21
YM35	S1k	0.47	2.23	2.80	1.08	0.42	0.22	0.56	4.01
YM50	S1k	0.41	0.74	2.66	1.08	0.42	0.22	0.56	3.47
YM32	∈	0.49	2.33	2.23	1.30	0.44	0.25	0.66	3.12
YM321	∈	0.48	1.17	3.74	1.31	0.46	0.24	0.69	3.48
YM322	∈	0.49	0.13	0.33	1.26	0.46	0.26	0.57	7.86
YM33	∈	0.48	1.80	3.61	1.22	0.46	0.24	0.67	4.06
YM33-H4	∈	0.45	0.59	2.35	1.28	0.49	0.30	0.50	3.91

表4 YM32下古生界潜山油气藏烃类化合物地球化学参数评价

Table 4 Evaluation of geochemical parameters of hydrocarbon compounds of YM32 Lower Paleozoic buried hill reservoirs

井名	层位	20S	$\frac{\sum nC_{21-}}{\sum nC_{22+}}$	NC_{22}/NC_{29}	SHI	MPR	F_1	F_2	$TAS C_{27(20R)}/C_{28(20R)}$	AHI	综合值
YM34	S1k	0.898	0.64	0.50	0.82	0.95	0.92	0.81	0.94	0.18	2.18
YM34-1H	S1k	0.939	0.81	0.49	0.83	0.00	0.76	0.68	0.86	0.17	2.13
YM342	S1k	0.000	0.24	0.43	0.76	0.77	0.79	0.69	0.80	0.24	1.11
YM343	S1k	0.898	0.22	0.54	0.76	0.70	0.00	0.00	0.00	0.24	1.48
YM34-H7	S1k	0.816	0.86	0.88	0.82	1.00	1.00	0.92	0.93	0.48	2.66
YM37	S1k	0.980	0.70	0.61	0.86	0.87	0.85	0.77	0.95	0.39	2.35
YM35	S1k	0.470	0.96	0.75	0.80	0.81	0.81	0.74	0.82	0.20	2.25
YM50	S1k	0.837	0.32	0.71	0.78	0.81	0.81	0.74	0.82	0.22	2.03
YM32	∈	1.000	1.00	0.60	0.76	1.30	0.89	0.81	0.96	0.24	2.75
YM321	∈	0.980	0.50	1.00	0.78	0.98	0.89	0.80	1.00	0.22	2.57
YM322	∈	0.992	0.00	0.00	0.89	0.94	0.88	0.84	0.83	0.11	1.19
YM33	∈	0.980	0.77	0.97	0.80	0.91	0.88	0.80	0.98	0.20	2.73
YM33-H4	∈	0.918	0.25	0.63	0.80	0.96	0.94	1.00	0.73	0.20	2.07

YM342 - YM343→YM34 - 1H→YM32, YM342 - YM343→YM34 - H7→YM33, YM342 - YM343→YM37 - YM35 和 YM322→YM321→YM32, 和 NC_{22}/NC_{29} 基本一致(图 10d). 对比表明, 单个地化参数仅反映油气运移路径的一部分, 油气运移示踪二步法反映油气运移路径的全部. 同时该方法仅从数据上可以直观得到油气运移路径, 单参数则需要与其他参数进行分析, 而且不易得到全面、准确的结论.

5.3 意义

油气运移路径是油气聚集成藏有利区. YM351-1H 井为 2017 年在奥陶系潜山发现的工业油气流, 该井位于 YM37 井以西 2.5 km, 处在 YM342 - YM343→YM37-YM35 油气运移路径, 表明这条路径为油气富集区. 在 YM351-1H 井和 YM37 南面发现 2 个圈闭, 面积之和大于 1 km², 远景资源量超过 1.00×10⁶ t, 为下步滚动评价和原油上产的有利区(图 1).

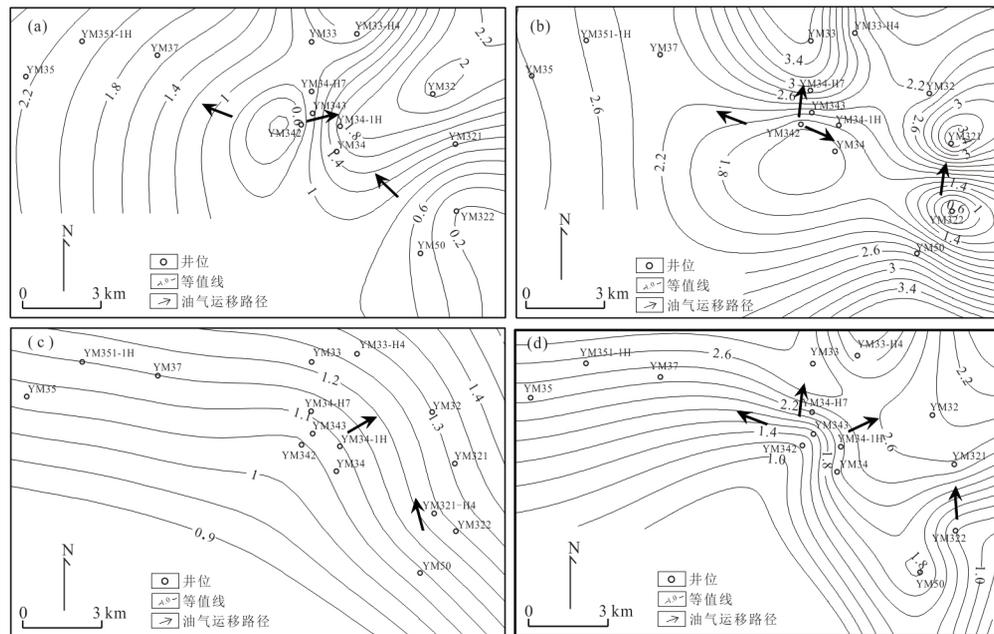


图 10 地球化学单参数分析与二步法对比

Fig.10 Comparison between single geochemistry parameter and step-by-step method

a. $\sum nC_{21} - \sum nC_{22} +$ 等值线平面图, b. nC_{22}/nC_{29} 等值线平面图, c. MPR 等值线平面图, d. 二步法等值线平面图

6 结论

(1) YM34 志留系油气藏样品中饱和烃 $nC_{21} - / nC_{22} +$ 、 $nC_{21} + nC_{22} / nC_{28} + nC_{29}$ 、20S 的值, 以及芳烃 MPR、甲基菲分布分数 F_1 和 F_2 、三芳甾烷 $C_{27}(20R)/C_{28}(20R)$ 值进行分析, 发现上述 7 项参数都具有自 YM342、YM343 井向 YM34、YM34-1H 等井增大的趋势, 显示油气运移具有自西向东的特征。

(2) 对 YM32 下古生界潜山油气藏的上述 7 项参数归一化处理, 以消除不同参数间的差异, 再结合族组分分析结果, 形成油气运移示踪二步法。

(3) 该方法表明 YM32 下古生界潜山油气藏有 2 个油气充注点和 4 条运移路径, 而油气运移示踪二步法具有全面、直观、准确表征油气藏油气运移路径的特点。在 YM342-YM343 \rightarrow YM37-YM35 油气运移路径上, 发现 2 个面积和大于 1 km^2 、资源量超过 $1.00 \times 10^6 \text{ t}$ 的潜力圈闭, 对油气评价和开发部署具有指向意义。

References

Bao, J.P., Zhu, C.S., Zhang, Q.C., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Crude Oil from Frontal Uplift in Kuqa Depression. *Journal of Oil and Gas Technology*, 29(4): 40–44, 164(in Chinese with English abstract).
Chen, W.B., Fu, X.G., Tan, F.W., et al., 2017. Geochemical

Characteristics and Significance of Permian Dolomite Oil Seepages in Qiangtang Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3):611–620(in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Bao, J.P., Liu, Z.Q., et al., 2010. Relationship between Methylphenanthrene Index, Methylphenanthrene Ratio and Organic Thermal Evolution: Take the Northern Margin of Qaidam Basin as an Example. *Petroleum Exploration and Development*, 37(4): 508–512(in Chinese with English abstract).

Chen, Z.H., Zha, M., Jin, Q., et al., 2010. The Evolution and Its Control on Maturation Parameters Relative to C_{27} Trisnorhopane in the Representative Faulted Lake-Basin: A Case Study from Paleogene System in Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(3): 635–642(in Chinese with English abstract).

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. doi:10.1144/gsjgs.144.2.0327

Guan, W.S., Zha, M., Zhang, C., et al., 2015. Quantitative Evaluation of Sealing Property of Fault Traps with Improving SGR Method: A Case of Yingmai 34 Area in Tabei Uplift. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(2):218–221(in Chinese with English abstract).

Guan, W.S., Duan, W.S., Zha, M., et al., 2017. Low-Relief Structural Imaging with Model-Based Tomographic Velocity Inversion. *Oil Geophysical Prospecting*, 52(1):87–

- 93, 16(in Chinese with English abstract).
- Guo, X.B., 2013. Analysis of Metabolites of Microbial Degradation of Crude Oil. Yangtze University Press, Jingzhou (in Chinese).
- Hao, X., Ren, Y.J., Xu, X.D., et al., 2016. Composition Characteristics and Geochemical Significance of Aromatic Hydrocarbon in Crude Oils in Eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 37(6): 674—680(in Chinese with English abstract).
- Huang, J.W., 2003. An Approach to the Application of Biomarkers to the Migration of Crude Oil in Tahe Oil District of the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(S1):573—577(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Zha, M., 2010. The Geology and Exploration of Oil and Gas. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Liang, D.G., Zhang, S.C., Zhao, M.J., et al., 2002. Hydrocarbon Accumulation in Kuqa Depression. *Chinese Science Bulletin*, 47(Suppl.):56—63(in Chinese).
- Lü, X.X., Yang, H.J., Wang, X., et al., 2010. Application of Geochemical Parameters in Hydrocarbon Migration Studies: Taking Tazhong Area of the Tarim Basin as an Example. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 838—846(in Chinese with English abstract).
- Lu, Z.H., Gan, H.J., Shi, Y., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Crude Oil and Oil-Source Correlation in the Western Fushan Depression. *Earth Science*, 41(11): 1909—1920(in Chinese with English abstract).
- Luo, J., Cheng, K.M., Fu, L.X., et al., 2001. Alkylated Dibenzothiophene Index—A New Method to Assess Thermal Maturity of Source Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 27—31, 7(in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Li, S.F., Hu, S.Z., et al., 2010. The Composition of Aromatic Hydrocarbon and Its Application in Petroleum Geochemistry. *Geological Science and Technology Information*, 29(6): 73—79(in Chinese with English abstract).
- Mo, X.Y., Zhang, M., Zhang, J., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Saturated Hydrocarbon and Its Genesis in Hure Oilfield of Western Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(5):848—853(in Chinese with English abstract).
- Su, J., Yang, H.J., Yang, W.J., et al., 2012. The Accumulation History of Continental Oil and the Hydrocarbons Enrichment Mechanism in the Silurian Unconformities of the Northern Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8):2493—2505(in Chinese with English abstract).
- Wang, T.G., He, F.Q., Li, M.J., et al., 2005. Molecular Markers of Injecting Pathway in Tracer Reservoirs: Alkyl Dibenzothiophene Series. *Chinese Science Bulletin*, 50(2):176—182(in Chinese).
- Wang, D.L., Li, Y., Jing, B., et al., 2007. Analysis of the Differences and Genesis for the Kekeya Oil in Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(2): 192—198(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.R., Chen, H.H., Zhao, Y.T., et al., 2018. Differences of Hydrocarbon Accumulation Periods in Silurian of Tazhong Northern Slope, Tarim Basin. *Earth Science*, 43(2):577—593(in Chinese with English abstract).
- Xu, T., Hou, D.J., Cao, B., et al., 2017. Characteristics of Aromatic Geochemistry in Light Oils from Xihu Sag in East China Sea Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(1): 182—192(in Chinese with English abstract).
- Zha, M., 1997. Geochemical Characteristics and Significance of Petroleum Migration in E_s³ and E_s⁴ Members, Dongying Depression. *Geoscience*, 11(4): 540—545(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Song, X.Y., Zhang, Z.R., et al., 2014. Quantitative Characteristics of Biomarkers of Crude Oils of Tahe Oil Field. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(2): 206—210, 217(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.J., Guan, P., Wu, Y.X., et al., 2018. Characterization on the Composition of Dibenzothiophene Series in Saline Lacustrine Sediments in Western Qaidam Basin and Its Environmental Implications. *Natural Gas Geoscience*, 29(6):908—920(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z.J., Jiang, Y.J., Cheng, Z., et al., 2009. Evaluating Maturity of Source Rocks by Aromatic Compounds: A Case from Dongling Block, Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 36(6): 790—796(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包建平, 朱翠山, 张秋茶, 等, 2007. 库车坳陷前缘隆起带上原油地球化学特征. *石油天然气学报*, 29(4):40—44, 164.
- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 等, 2017. 羌塘盆地二叠系白云岩油苗地球化学特征及意义. *沉积学报*, 35(3):611—620.
- 陈琰, 包建平, 刘昭茜, 等, 2010. 甲基菲指数及甲基菲比值与有机质热演化关系——以柴达木盆地北缘地区为例. *石油勘探与开发*, 37(4):508—512.
- 陈中红, 查明, 金强, 等, 2010. 典型断陷湖盆 C₂₇ 三降藿烷参数演化及其控制因素——以东营凹陷古近系为例. *沉积学报*, 28(3):635—642.
- 管文胜, 查明, 张超, 等, 2015. 利用改进的 SGR 方法定量评价断层圈闭封堵性——以塔北隆起英买 34 井区为例. *新疆石油地质*, 36(2):218—221.

- 管文胜,段文胜,查明,等,2017.利用基于模型的层析速度反演进行低幅度构造成像.石油地球物理勘探,52(1):87-93,16.
- 郭晓博,2013.微生物降解原油及其代谢产物的分析.荆州:长江大学出版社.
- 郝鑫,任拥军,徐新德,等,2016.北部湾盆地乌石凹陷东部原油芳香烃组成特征及地球化学意义.新疆石油地质,37(6):674-680.
- 黄继文,2003.塔里木盆地塔河油区原油生物标志化合物在运移方面的应用探讨.石油实验地质,25(S1):573-577.
- 蒋有录,查明,2010.石油天然气地质与勘探.北京:石油工业出版社.
- 梁狄刚,张水昌,赵孟军,等,2002.库车坳陷的油气成藏期.科学通报,47(增刊):56-63.
- 卢政环,甘华军,时阳,等,2016.福山凹陷西部地区原油地化特征与油源对比.地球科学,41(11):1909-1920.
- 罗健,程克明,付立新,等,2001.烷基二苯并噻吩——烃源岩热演化新指标.石油学报,22(3):27-31,7.
- 吕修祥,杨海军,王祥,等,2010.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.石油与天然气地质,31(6):838-846.
- 马军,李水福,胡守志,等,2010.芳烃化合物组成及其在油气地球化学中的应用.地质科技情报,29(6):73-79.
- 莫晓靛,张敏,张俊,等,2011.柴达木盆地尕斯库勒油田原油饱和烃地球化学特征及成因研究.天然气地球科学,22(5):848-853.
- 苏劲,杨海军,杨文静,等,2012.塔里木盆地北部志留系顶面不整合中陆相原油的成藏历史与油气富集机制.岩石学报,28(8):2493-2505.
- 王东良,李勇,敬兵,等,2007.塔里木盆地柯克亚地区原油差异与成因分析.石油实验地质,29(2):192-198.
- 王倩茹,陈红汉,赵玉涛,等,2018.塔中北坡顺托果勒地区志留系油气成藏期差异性分析.地球科学,43(2):577-593.
- 王铁冠,何发岐,李美俊,等,2005.烷基二苯并噻吩类:示踪油藏充注途径的分子标志物.科学通报,50(2):176-182.
- 许婷,侯读杰,曹冰,等,2017.东海盆地西湖凹陷轻质原油芳烃地球化学特征.沉积学报,35(1):182-192.
- 张渠,宋晓莹,张志荣,等,2014.塔河油田原油生物标志物定量特征研究.石油实验地质,36(2):206-210,217.
- 查明,1997.东营凹陷沙三、沙四段石油运移地球化学特征及意义.现代地质,11(4):540-545.
- 周叶骏,关平,吴颜雄,等,2018.柴达木盆地西部咸水湖相沉积有机质中二苯并噻吩类组成特征及环境意义.天然气地球科学,29(6):908-920.
- 朱战军,江永健,程喆,等,2009.利用芳烃化合物评价烃源岩成熟度——以松辽盆地东岭区块为例.石油勘探与开发,36(6):790-796.