

文章编号: 1001- 6112(2008)02- 0169- 05

渤海湾盆地梁家楼地区油气充注的分子示踪

王广利¹, 张林晔², 陈致林², 宋长玉², 王 茹², 王铁冠¹

(1. 中国石油大学 教育部油气成藏机理重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 梁家楼油田是发育在渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷沙三中亚段的一个深水浊积扇, 精细油源对比表明, 其油气主要来源于沙三下亚段和沙四上亚段 2 套不同沉积环境下形成的优质烃源层。运用分子成熟度梯度、含氮化合物等指标对不同原油族群的示踪研究表明, 该油田油气有 3 个主要充注点, 分别从西北、东北和南部 3 个方向沿断层和砂体向梁北、梁中和梁南块进行垂向和侧向运移, 并充注成藏; 尽管主要成藏期均发生在明化镇组沉积时期, 包裹体分子记录结果仍然表明沙四段油气的充注早于沙三段。

关键词: 含氮化合物; 分子示踪剂; 生物标志物; 油气包裹体; 梁家楼油田; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

MOLECULAR TRACING OF OIL FILLING IN LIANGJIALOU AREA, THE BOHAI BAY BASIN

Wang Guangli¹, Zhang Linye², Chen Zhilin², Song Changyu², Wang Ru², Wang Tieguan¹

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education,

China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Geological Scientific

Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Liangjialou Oilfield is a deep-water turbidite fan developed in the middle part of the 3rd member of Shahejie Formation (Es^3) in the Dongying Sag of the Jiyang Depression, the Bohai Bay Basin. The detailed oil-source correlation study shows that oil in this oilfield mainly sources from two sets of excellent source rocks formed under different depositional environments in the lower part of Es^3 and the upper part of Es^4 . Two geochemical indicators, the molecular maturity and the nitrogen compound, are used to study the roles in tracing the crude oil families from different sources. The results show that two ratios of the molecular tracers, the benzocarbazole [a]/[c] and the 4-*t*-methyl dibenzothiophene (MDBT), both indicate that oil in Liangjialou Oilfield has 3 main filling points, with oil migrating vertically and laterally from the northwest, the northeast and the south respectively along the existing faults and sand bodies into the northern, the middle and the southern Liangjialou Oilfield. Biomarkers in oil inclusions suggest that oil originated from Es^4 had filled into this oilfield earlier than that from Es^3 , although the filling events of both sources of oil occurred in the same Minghuazhen Formation of the Neocene period.

Key words: nitrogen compound; molecular tracer; biomarker; oil inclusion; Liangjialou Oilfield; the Bohai Bay Basin

油气运移和充注成藏是一个历史的、动态的过程, 如何再现这一过程是当前油气勘探和石油地质研究的重要内容。国内外许多研究和勘探实践表明, 运用分子成熟度梯度和非烃化合物浓度的变化, 可以较好地示踪同一原油族群的运移和充注路径^[1-4], 而油气包裹体中的烃类组成则是成藏历

史的分子记录^[5-8]。含氮化合物的分布在一定程度上受到沉积环境和成熟度的影响, 因此利用含氮化合物变化示踪油气运移应当针对来源于同一源岩灶的同一族群原油^[9,10]。本研究以渤海湾盆地东营凹陷梁家楼地区为例, 探讨了陆相断陷盆地中油气的运移和充注史。

收稿日期: 2007- 04- 05; 修订日期: 2008- 02- 19。

作者简介: 王广利(1973-), 男, 博士, 讲师, 主要从事有机地球化学研究。E-mail: sydxwgl@yahoo.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40703011)。

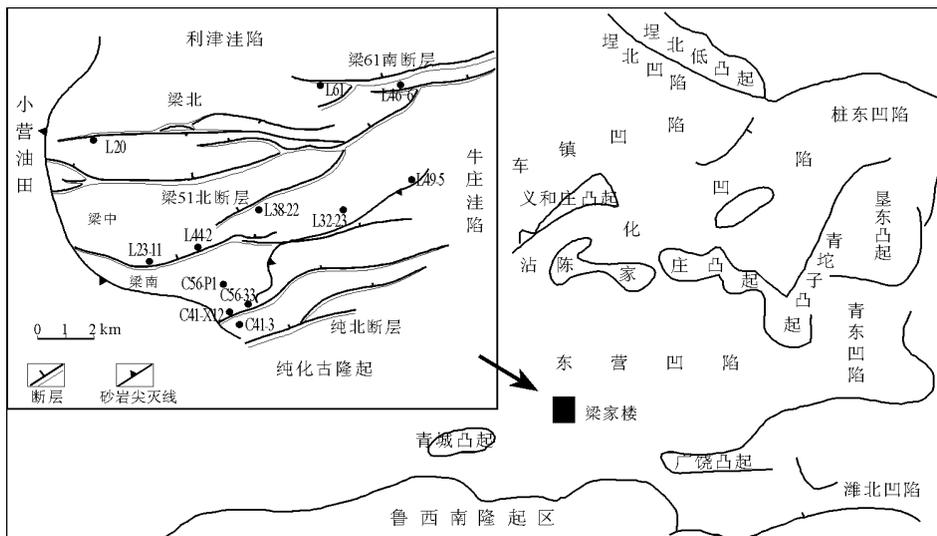


图1 渤海湾盆地梁家楼地区构造位置

Fig.1 Location of the Liangjialou area, the Bohai Bay Basin

1 原油族群与烃源层

1.1 地质背景

梁家楼油田位于渤海湾盆地东营凹陷利津洼陷东南部的斜坡上(图1),南部通过纯北断层与纯化古隆起相接,北部紧邻利津洼陷生油中心,东部以构造脊线与牛庄洼陷相邻,西部以洼陷的轴线与小营油田遥遥相对^[11,12]。该油田自南而北被多条近东西走向的断层切割成依次降低的含油台阶,其中较大的断层有梁23—梁32,梁202—梁37—梁44和梁61—梁62断层。这3条断层断距和延伸长度较大,均为北倾的同沉积断层,对油气分布有局部控制作用。断层两侧油水界面不同,将梁家楼油田划分为梁南、梁中、梁北3个主要区块。主力油层沙三中段属湖成深水浊积扇沉积,平面上呈窄窄北宽扇形分布,东西剖面上呈顶平底凸形态。

1.2 原油族群划分与烃源层

根据分子标志物组成和分布特征,梁家楼地区原油可以划分为梁北、梁南2个族群,它们在生源、古沉积环境和成熟度等诸多方面存在明显差异。

2个族群原油的正构烷烃分布均以C₁₁—C₃₈为主,主峰碳为C₂₃。从奇偶优势和Pr/Ph来看,梁南原油碳优势指数(CPI)和奇偶优势指数(OEP)略小于1.0,略具偶碳优势,Pr/Ph为0.30~0.41,反映源岩沉积时湖盆相对闭塞和强还原的特征;梁北原油CPI和OEP均大于1,为1.08~1.14,具奇碳优势,Pr/Ph为0.79~1.33,表明梁北原油母源沉积湖盆开阔,还原性相对减弱。从Pr/C₁₇与Ph/C₁₈关系曲线(图2)可以看到梁北、梁

中、梁南地区原油落在不同的区域,反映其沉积环境和成熟演化存在明显差异。梁北原油成熟度最高,梁南原油成熟度较低,且从梁北到梁南,还原性增加。梁南原油由于成熟度上的差别可以进一步分为纯56块和纯47块2个族群,纯47块略高于纯56块。而位于梁北、梁南之间的梁中原油不是一个单独的族群,其西部类似于梁北,而东部梁32—23井和梁49—5井原油则向梁南原油靠拢。

在C₂₇, C₂₈, C₂₉规则甾烷组成中,样品分布十分集中,C₂₇甾烷在40%~50%之间,含量最高,表明梁家楼地区原油均以藻类、细菌等低等水生生物为主要生源;但进一步分析表明,梁北、梁南原油在生源上仍然存在差异。在梁南原油中,规则甾烷/17 α -藿烷为0.78~1.85,甲藻甾烷/4 α -甲基-24-乙基胆甾烷为0.42~0.90;而梁北原油前者

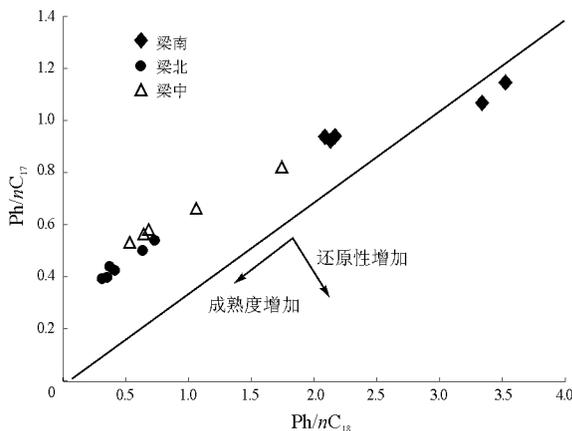


图2 渤海湾盆地梁家楼原油 Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈关系

Fig.2 Pr/nC₁₇ versus Ph/nC₁₈ of the crude oil from Liangjialou Oilfield, the Bohai Bay Basin

为 0.13~ 0.22, 后者为 0.25~ 0.53, 即梁南原油甾烷和甲基甾烷含量丰富, 指示其生源以藻类为主, 沟鞭藻的贡献很大; 而梁北原油藿烷含量高, 表明其生源以藻类和细菌为主, 有机质可能经历过强烈的细菌改造作用。从生源看, 梁中地区西部原油同样类似于梁北, 东部梁 32—23 井和梁 49—5 井原油则与梁南接近(图 3)。

梁南原油伽马蜡烷十分丰富, 伽马蜡烷指数为 0.35~ 0.55, 而梁北原油仅为 0.06~ 0.10(图 4)。伽马蜡烷来源于某些原生动物, 它的大量出现, 反映沉积水体咸化, 并具有随季节变化分层的特点。同时, 梁南原油中异常分布的 C₃₅ 藿烷(C₃₅/ C₃₄ 藿烷为 0.77~ 0.91) 进一步反映了源岩为强还原沉积

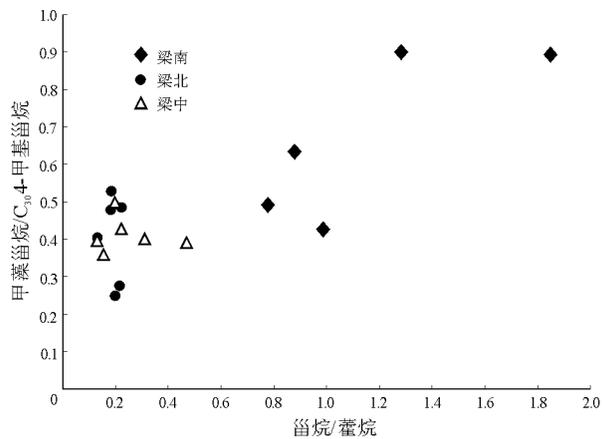


图 3 渤海湾盆地梁家楼原油甲藻甾烷/ C₃₀-4 甲基甾烷与甾烷/ 藿烷关系

Fig. 3 Dinosterane/ C₃₀-4 methyl sterane ratios versus sterane/ hopane ratios of the crude oil from the Liangjialou Oilfield, the Bohai Bay Basin

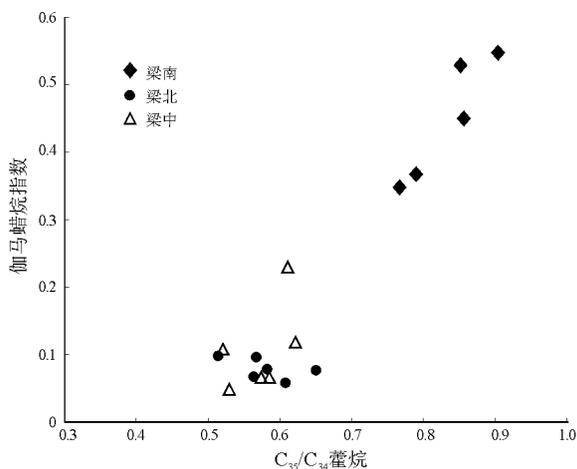


图 4 渤海湾盆地梁家楼原油伽马蜡烷指数与 C₃₅/ C₃₄ 藿烷关系

Fig. 4 Gammacerane indexes versus C₃₅/ C₃₄ hopane ratios of the crude oil from the Liangjialou Oilfield, the Bohai Bay Basin

相。梁北原油则以高丰度重排甾烷、C₂₇ 18α(H) - 22, 29, 30- 三降藿烷(T_s)、18α(H) - 30- 降新藿烷(C₂₉ T_s) 等作为其显著特征。这些重排化合物的发育, 显示其母源矿物以粘土类为主, 并且热演化程度较高。

梁南、梁北地区原油中芳烃馏分的分布和变化具有类似的规律(图 5)。梁北原油(以梁 61 井为例) 最重要的芳烃组分为萘、菲系列以及烷基苯系列, 梁南原油(以纯 56—平 1 井为例) 芳烃中优势组分则为烷基苯系列, 并且植烷基苯和 1- 甲基- 3- 植烷基苯十分发育, 其成因似乎与该区原油饱和烃中丰富的植烷有某种联系。梁中原油兼有以上 2 类油的某些特征, 既有较高含量的萘、菲、烷基苯系列, 同时植烷基苯和 1- 甲基- 3- 植烷基苯亦十分突出。二苯并噻吩与菲的相对含量主要受沉积环境的影响, 梁南原油中二苯并噻吩/ 菲比值为 0.08~ 0.22, 梁北原油为 0.08, 显示梁南原油环境较梁北还原性增强。

通过以上讨论可以看到, 梁家楼油田 2 个原油族群在生源、沉积环境、成熟度上均存在明显差别, 它们分别与利津洼陷 2 套优质烃源层相对应。梁北原油为成熟原油, 以“高 4—甲基甾烷、高重排甾烷和藿烷、低伽马蜡烷”为特征, 芳烃中二环萘、三环菲为优势化合物, 以藻类和细菌等低等生物为主

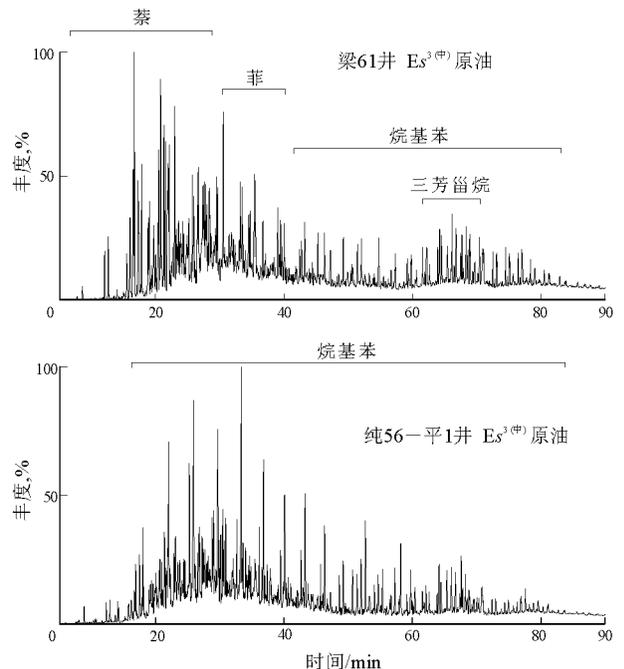


图 5 渤海湾盆地梁家楼地区梁北(梁 61 井)、梁南(纯 56—平 1 井)原油芳烃总离子分布

Fig. 5 TIC of the aromatic fractions of the crude oil from the northern and southern Liangjialou Oilfield, the Bohai Bay Basin

要生源,具有深湖一半深湖相微咸水至淡水的沉积环境,来自利津洼陷沙三下亚段烃源岩;梁南为低成熟—成熟原油,具有“高植烷、高伽马蜡烷、高C₃₅升藿烷、低4—甲基甾烷”的特征,芳烃中以长链烷基苯为主,以藻类为主要生源,具有较为咸化的沉积环境,来自沙四上亚段烃源岩;梁中地区为2类油相交的区域,具有混源特征,向西逐渐与梁北原油接近,向东与梁南原油类似。

2 油气充注方向与路径示踪

分析结果表明,梁家楼油田苯并咔唑化合物含量丰富,均由[a],[b],[c]3种基本构型组成,且以稳定性较强的苯并咔唑[a]和苯并咔唑[c]为主。根据分子热力学原理,苯并咔唑[a]/[c]值随着有效运移距离的增加而降低^[13]。4—/1—甲基二苯并噻吩(MDBT)与咔唑分子结构类似,只是硫元素替代了咔唑结构中的氮元素,它同咔唑类化合物一样,可以有效地示踪油藏充注过程^[14]。

分子标志物示踪研究结果表明,梁家楼油田北部和南部2个原油族群具有不同的充注点和充注方式(图6)。源于沙三下亚段的北部原油族群具有2个充注点,分别位于梁51北断层和梁61南断层附近。其苯并咔唑[a]/[c]值较高,为0.93~1.50,指示油气运移距离不远。其中梁北地区原油苯并咔唑[a]/[c]值为1.42~1.50,梁中西部为0.93~1.26,梁中西部原油运移距离要远于梁北,可以推断它们是分别沿沟通沙三下亚段烃源岩和沙三中亚段储集层的梁51北断层和梁61南断层2条油源断层进行垂向运移和充注的。油气进入储集层以后,沿地层倾斜方向继续向梁北和梁中运移,在梁中地区,由于梁38和梁28断层的封堵,油气停止了向南、东方向的大规模运移,在断层附近积聚,形成断块油藏。因此该类原油主要分布于梁北和梁中西部。源自沙四上亚段的东部原油族群有2个十分明显的充注点。第一个充注点位于梁61南断层附近,从梁中东北部低台阶的梁49—5井到梁南西南部高台阶的纯47、纯56块,苯并咔唑[a]含量逐渐降低,苯并咔唑[a]/[c]值由梁49—5井的1.25,到梁32—23井的0.99,到纯56块则降为0.86~0.92;苯并咔唑[b]丰度也在降低,苯并咔唑[b]/[c]值由0.14~0.18降至0.03~0.08。4—/1—MDBT值则由梁49—5井的2.79,到梁32—23的1.92,到纯56块则降为1.08~1.17。苯并咔唑[a],[b]与[c]以及4—MDBT,1—MDBT相对丰度的演变,展现出一个良好的油气运移剖

面。这套优质烃源岩生成的油气自东北部低台阶逐级向西南部高台阶侧向运移,遇到断层则进行垂向运移,油水边界逐级升高,由梁32—梁38断块的2875 m到纯56块的2598 m,储集层也由沙三中亚段油积扇体变为纯47块的纯化镇组。另一个充注点位于纯北断层,苯并咔唑[a]/[c]值由纯41—3井的0.93降至纯41—x12井的0.70。其油气是沙四上亚段通过纯北断层直接运移上来,在异常高压作用下向断层下降盘进行充注。可见,梁家楼地区是不同优质烃源层和不同源岩灶共同的充注方向,因而形成丰富的油气聚集。咔唑类化合物的绝对含量、1,4—/1,5—二甲基咔唑和2,4—/2,5—二甲基咔唑等指标指示了相同的运移方向和充注路径。

研究表明,东营凹陷有早、晚2个主要成藏期,分别发生在东营组和明化镇组沉积时期^[15]。作为一“北陡南缓”的箕状凹陷,东营凹陷古近系烃源岩沉积中心位于陡坡带,早期成藏主要分布于陡坡带一侧,如王庄油田和胜坨油田二、三区等,东营组沉积末期喜山运动使得盆地整体抬升并受到强烈剥蚀,因此这个时期形成的油气藏受到不同程度的破坏,往往为稠油。梁家楼地区油气来源于利津洼陷缓坡带,油气藏主要形成于明化镇组沉积时期,为保存较好的正常原油^[15]。包裹体生物标志物分析结果表明南部族群充注早于北部族群。梁38—6,梁44—4,纯17,纯371等井包裹体分析结果(表1)全部展示了沙四段烃源岩的特征:伽马蜡烷较为发育,伽马蜡烷指数介于0.18~0.29,重排甾烷和

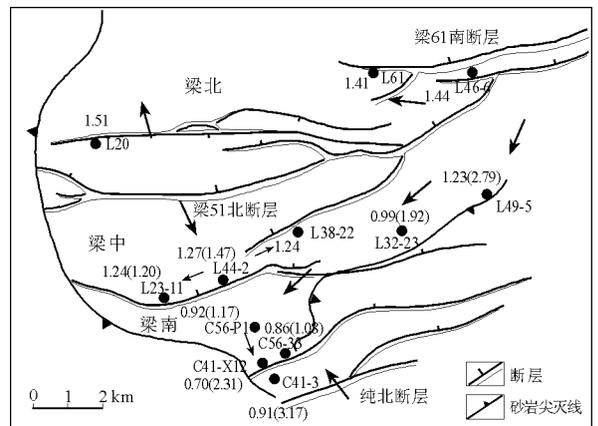


图6 苯并咔唑[a]/[c]和4—/1—MDBT示踪的渤海湾盆地梁家楼地区油气充注方向与路径
图中数字代表苯并咔唑[a]/[c]值(括号内为4—/1—MDBT值);箭头代表油气运移方向。

Fig. 6 Oil charging orientation and pathway indicated by benzo carbazole [a]/[c] and 4-/1-MDBT ratios in Liangjialou area, the Bohai Bay Basin

表 1 渤海湾盆地梁家楼地区储层烃与包裹体烃分子参数对比
Table 1 Comparison of biomarker parameters between the reservoir oil and the oil inclusions in Liangjialou area, the Bohai Bay Basin

井名	类别	甾烷				三环萜 烷/17 α - 藿烷	伽马蜡 烷指数	藿烷/ 甾烷
		C ₂₇ : C ₂₈ : C ₂₉	C ₂₉ 20S/ (20S+20R)	C ₃₀ 4- 甲基/ C ₂₉ 甾烷	C ₂₇ 重排/ 规则			
L44- 4	储层烃	40: 22: 38	0.37	0.67	0.28	0.03	0.07	7.08
	包裹体	37: 26: 37	0.35	0.40	0.18	0.14	0.25	3.60
L38- 6	储层烃	41: 22: 38	0.38	0.59	0.26	0.03	0.07	6.53
	包裹体	36: 25: 39	0.37	0.46	0.15	0.08	0.18	4.07
C17	储层烃	36: 26: 38	0.36	0.35	0.09	0.10	0.40	1.38
	包裹体	38: 26: 36	0.35	0.34	0.14	0.12	0.29	2.54
C371	储层烃	39: 25: 36	0.37	0.31	0.07	0.06	0.53	0.94
	包裹体	42: 27: 31	0.37	0.33	0.18	0.14	0.23	2.89

4- 甲基甾烷含量较低, 重排甾烷/规则甾烷为 0.14~ 0.18, C₃₀4- 甲基甾烷/C₂₉甾烷介于 0.33~ 0.46, 成熟度较低, 甾烷异构化参数 C₂₉20S/(20S+20R) 为 0.35~ 0.37。这表明源自沙四段的东部原油族群的充注早于源自沙三段的西部原油族群, 沙四段所生原油先期进入储层后, 由于成岩过程中的压实、溶解、胶结、重结晶作用等, 或由于矿物微裂隙的后期愈合作用, 形成了大量油气包裹体。梁中地区后期又有沙三下亚段烃源岩排出的油气自西向东大规模运移, 与原有原油发生混合, 因此在梁中地区普遍存在混源现象。

3 结论

运用成熟度梯度、含氮化合物等分子示踪剂对不同原油族群的示踪研究表明, 渤海湾盆地梁家楼浊积扇油藏有 3 个主要充注点, 分别从西北、东北和南部 3 个方向沿断层和砂体向梁北、梁中和梁南块进行垂向和侧向运移, 并充注成藏; 包裹体分子记录结果表明沙四段的油气充注早于沙三段, 但是主要成藏期均发生在明化镇组沉积时期。因此, 在地质研究和精细油源对比的基础上, 运用地球化学和物理化学的基本原理, 根据分子示踪剂的变化, 可以较好地恢复陆相断陷盆地中油气的充注成藏历史, 进而探讨油气成藏规律, 提高勘探效益。

参考文献:

1 England W A. The organic geochemistry of petroleum reservoirs [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16: 415~ 425

2 刘洛夫, 霍红, 李超等. 利用咪唑类化合物研究油气的运移: 以塔里木盆地环阿凡提凹陷志留系古油藏为例 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(4): 366~ 369

3 王传刚, 王铁冠. 应用吡咯类化合物探讨彩南油田油气运移 [J]. *石油实验地质*, 2003, 25(6): 740~ 745

4 Peters K E, Fowler M G. Applications of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 5~ 36

5 Jones D M, Macleod G. Molecular analysis of petroleum in fluid inclusions: A practical methodology [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 1163~ 1173

6 潘长春, 杨坚强. 油气藏微观不均一性及其意义 [J]. *沉积学报*, 1998, 16(4): 98~ 104

7 顾忆, 邵志兵, 陈强路等. 塔河油田油气运移与聚集规律 [J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 12~ 18, 25

8 王雪玲, 刘中戎. 江汉盆地西南缘油气运移和成藏期次 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 52~ 56

9 Clegg H, Wilkes H, Horsfield B. Carbazole distributions in carbonate and clastic source rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(24): 5335~ 5345

10 Clegg H, Wilkes H, Oldenburg T, et al. Influence of maturity on carbazole and benzocarbazole distributions in crude oils and source rocks from the Sonda de Campeche, Gulf of Mexico [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29: 183~ 194

11 宁方兴, 郝雪峰, 王福勇等. 高分辨率层序地层学在东营凹陷梁家楼地区的应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(6): 49~ 52

12 郝雪峰, 宗国洪, 熊伟等. 陆相断陷盆地成藏组合体成藏模式探讨: 以东营凹陷梁家楼油田为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(5): 19~ 21

13 Larter S R, Bowler B F J, Li M, et al. Molecular indicators of oil migration distances [J]. *Nature*, 1996, 383: 593~ 597

14 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

15 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2005. 1~ 202

(编辑 吴传芝)